

一种基于刚性坐标系的工业测量系统数据处理方法

景冬, 卢秀山, 郑文华, 于胜文, 刘尚国

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要:在构建的新型三维工业测量系统中,分析了电子经纬仪观测数据的处理方法。应用虚拟相片概念,将观测数据转化为虚拟相片数据。通过采用刚性测量坐标系,忽略仪器整平误差带来的影响,减少了数据处理计算量。结合摄影测量光束法数据处理理论,实现了对仪器观测数据的解算平差,获得了与目前成熟工业测量系统软件同等的解算精度。

关键词:工业测量系统;刚性坐标系;虚拟相片;光束法

中图分类号:P209

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)03-0033-05

A Data Processing Method for Industrial Measuring System Based on Rigid Coordinate System

JING Dong, LU Xiushan, ZHENG Wenhua, YU Shengwen, LIU Shangguo

(Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: This paper analyzed a method for processing data observed with electronic theodolite in construction of a new type of 3 D industrial measuring system (IMS). The concept of virtual photograph was applied to convert the observational data to virtual photograph data. Based on the rigid coordinate system, the impact of device grading errors could be avoided and the computational load of data processing could be reduced. In terms of combining with the light beam data processing theory in photogrammetry, the proposed method realized the calculation and balancing of instrument observation data and obtained the same precision in solving process compared with the current mature IMS software.

Key words: industrial measuring system; rigid coordinate system; virtual photograph; light beam method

工业测量系统(industrial measurement system, IMS)是依靠光学角度测量仪器,采用前方交会的方法对部件、产品及构筑物进行非接触三维坐标测量,并对测量数据进行处理、分析和管理的系统。传统三维空间角度前方交会平差方法,先采用平面角度前方交会的方法计算出目标点的平面坐标,然后通过三角计算的方法求得目标点高程坐标,故该方法在数据处理中只能在 z 轴方向进行精度评定。上述数据处理方法并不严密,无法满足精度要求较高的工业测量系统数据处理的要求^[1-2]。在工业测量观测工程中,为了对空间前方交会单点坐标中误差(尤其是对其平面中误差)进行估计,并对观测计算的坐标值进行平差,需要探究其合理的解算方法。

1 虚拟相片的生成

光束平差法作为较为严密的观测数据处理方法在摄影测量方面得到广泛应用。结合工业测量系统的特

收稿日期:2010-05-12

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20093718110002)。

作者简介:景冬(1982—),男,山东泰安人,博士研究生,主要从事摄影测量和工业测量研究。E-mail:ldqdhm@hotmail.com。

点,在目前的国内的工业测量系统数据处理研究中,多选择光束法作为系统观测数据的处理方法^[3-4]。为便于把测角前方交会转换为近景摄影测量,在研究中将虚拟相片概念引入到了系统观测数据处理中。通过将工业测量测角仪器对目标点观测所获取的角度测量数据,转换为虚拟相片的像平面坐标,进而通过柔性坐标系模型实现对目标点坐标的解算^[5]。

如图 1 所示,若设观测仪器某一视线方向为虚拟相片主轴,在设定一虚拟相片焦距 f 的情况下,可通过观测仪器对观测目标点 P 视线与虚拟相片像点计算出该目标点在虚拟相片上的坐标。

设物点 P 在空间测量坐标系(测站 A 经纬仪仪器中心坐标系)中的坐标为 $(x_{p_2}, y_{p_2}, z_{p_2})$,在测站 B 经纬仪仪器中心坐标系中的坐标为 $(x_{p_1}, y_{p_1}, z_{p_1})$,对应于左、右虚拟像点坐标为 $(x_1, z_1), (x_2, z_2)$ 。设测站 B 测角仪器中心坐标系相对于空间测量坐标系的角度旋转元素为 $(\varphi, \omega, \kappa)$,因而旋转矩阵为^[6]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $a_1 = \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa, a_2 = -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa, a_3 = -\sin \varphi \cos \omega, b_1 = \cos \omega \sin \kappa, b_2 = \cos \omega \cos \kappa, b_3 = -\sin \omega, c_1 = \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa, c_2 = -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa, c_3 = \cos \varphi \cos \omega$ 。

在柔性坐标系模型中,两台测角仪器各自的测量坐标系相互独立,具有对仪器自身性能要求较低、不需要观测仪器的高精度整平的优点。但该方法中两测站间的旋转矩阵 \mathbf{R} 的确定较为复杂,除各仪器坐标系之间尺度比例变换系数 λ_1 和 λ_2 外,通常依靠将工业测量基准尺多次摆放,每次分别观测基准尺上两个控制点,然后利用空间后方交会原理,解算出测站 B 到测站 A 进行坐标系转换时所需的角元素 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 。

如果能够将两测站的测站坐标系直接转化为基于大地水平面的刚性坐标系,并获取相应的观测值,则可消除数据处理中角元素计算相关的计算量,提高作业效率。

2 刚性坐标系的建立

目前,高精度角度工业测量仪器具备了仪器倾斜补偿功能,可对较小范围内的仪器整平误差进行补偿。特别是工业测量电子经纬仪,由于望远镜内部安装了内觇标,仪器在整平后,可通过互瞄确定测站之间的基线方向。由于没有激光测距设备,设备成本较低,两台此类电子经纬仪价格约合一台同样测角精度的全站仪价格。如果忽略仪器整平误差,则仪器水平度盘平行于水平面,仪器竖轴平行于铅垂线。此时分别以两测站自身仪器中心为原点,以两测站基线在水平面上的投影方向为 x 轴方向,铅垂方向为 z 轴方向, y 轴朝向目标点垂直于上述两轴建立右手坐标系。则两测站的 y 轴平行, x 轴与 y 轴确立的坐标平面平行于水平面,因此测站坐标系可视为刚性坐标系。

过两测站得假定虚拟相片像主点,虚拟相片的主轴方向定为两测站各自坐标系的 y 轴方向,两测站虚拟相片主横轴 x_A 和 x_B 平行于测站坐标系 x 轴,主纵轴 z_A 和 z_B 定为平行于各自 z 轴的铅垂方向。这样对目标点的观测就转化为正直摄影方式,则在该状态下测站 B 测角仪器中心坐标系相对空间测量坐标系的角度旋转元素 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 均为 0,将其带入式(1)可得

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

测站 B 测角仪器中心坐标系的原点在测量坐标系中坐标为 (x_B, y_B, z_B) ,因两测站共线方程为

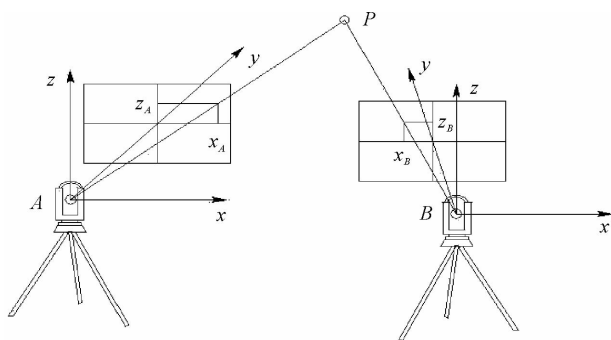


图 1 虚拟相片的生成图

Fig. 1 Creating of virtual photograph

$$\begin{cases} x_1 = f \cdot x/y \\ z_1 = f \cdot z/y \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_2 = f \cdot \frac{a_1(x_{p_1} - x_B) + b_1(y_{p_1} - y_B) + c_1(z_{p_1} - z_B)}{a_2(x_{p_1} - x_B) + b_2(y_{p_1} - y_B) + c_2(z_{p_1} - z_B)} = f \cdot \frac{x - x_B}{y - y_B} \\ z_2 = f \cdot \frac{a_3(x_{p_1} - x_B) + b_3(y_{p_1} - y_B) + c_3(z_{p_1} - z_B)}{a_2(x_{p_1} - x_B) + b_2(y_{p_1} - y_B) + c_2(z_{p_1} - z_B)} = f \cdot \frac{z - z_B}{y - y_B} \end{cases}, \quad (4)$$

则测站 B 共线方程包含了定向参数信息,系统定向完成后,可进行实时三维坐标测量。

3 观测数据处理

设测站 A 和 B 与像点相对于测站坐标系的比例系数分别为 λ_1 和 λ_2 , 则对于被测物点 p 有:

$$\begin{bmatrix} x_{p_1} \\ y_{p_1} \\ z_{p_1} \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ f \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_{p_1} - x_B \\ y_{p_1} - y_B \\ z_{p_1} - z_B \end{bmatrix} = \lambda_2 \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ f \\ z_2 \end{bmatrix} = \lambda_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ f \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

所以,对一个物点可列 6 个方程,而未知数为 5 个,即 $x_{p_1}, y_{p_1}, z_{p_1}, \lambda_1, \lambda_2$ 。由式(5)、式(6)可得到联测观测方程

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -y_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由式(7)可得

$$\mathbf{V} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{C}] \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} - \mathbf{L}. \quad (8)$$

其中: $\mathbf{V} = [v_x \quad v_y \quad v_z]$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -z_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_2 & -y_2 & -z_2 \end{bmatrix}^T$,

$\mathbf{X} = [x_A \quad y_A \quad z_A]^T$, $\mathbf{t} = \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T$, $\mathbf{L} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad x_B \quad y_B \quad z_B]^T$ 。

式(8)依最小二乘法可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}^T \mathbf{B} & \mathbf{B}^T \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T \mathbf{B} & \mathbf{C}^T \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{B}^T \mathbf{L} \\ \mathbf{C}^T \mathbf{L} \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

为方便计算,将系数矩阵和常数矩阵使用符号替代可得

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{11} \mathbf{X} + \mathbf{N}_{12} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{N}_{12}^T \mathbf{X} + \mathbf{N}_{22} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{u}_2 \end{cases}. \quad (10)$$

式中: $\mathbf{N}_{11} = 2\mathbf{I}_{3 \times 3}$, $\mathbf{N}_{12} = \begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -z_1 \\ -x_2 & -y_2 & -z_2 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{N}_{22} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & 0 \\ 0 & x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{u}_1 = [x_B \quad y_B \quad z_B]^T$,

$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_2 x_B - y_2 y_B - z_2 z_B \end{bmatrix}$ 。

消去 $\boldsymbol{\lambda}$ 后可直接求出被测物点坐标

$$\mathbf{X} = (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{N}_{12}^T)^{-1} (\mathbf{u}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{u}_2) \quad (11)$$

2 台观测仪器同时观测 1 个物点, 可得到 4 个观测量, 因此可产生 1 个多余观测, 即检核条件(误差), 这一检核条件是进行观测值粗差检测的唯一依据。故在实时三维坐标测量时应给出这一误差。实际上即为量测站对被测目标点 2 条光束在空间不相交的误差。

由方程式(10)消去 \mathbf{X} 后, 可得:

$$\lambda = (\mathbf{N}_{22} - \mathbf{N}_{12}^T \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{N}_{12})^{-1} (\mathbf{u}_2 - \mathbf{N}_{12}^T \mathbf{N}_{11}^{-1} \mathbf{u}_1) \quad (12)$$

将计算出的 λ_1 和 λ_2 代入式(5)、式(6)可分别得到两测站各自解算出的被测目标点坐标 $(x_{p_1}, y_{p_1}, z_{p_1})$ 和 $(x_{p_2}, y_{p_2}, z_{p_2})$:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{p_1} + x_{p_2}}{2} \\ \frac{y_{p_1} + y_{p_2}}{2} \\ \frac{z_{p_1} + z_{p_2}}{2} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} m_{x_p} \\ m_{y_p} \\ m_{z_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left| \frac{x_{p_2} - x_{p_1}}{2} \right| \\ \left| \frac{y_{p_2} - y_{p_1}}{2} \right| \\ \left| \frac{z_{p_2} - z_{p_1}}{2} \right| \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$m = \sqrt{m_{x_p}^2 + m_{y_p}^2 + m_{z_p}^2} \quad (15)$$

4 实验与分析

4.1 实验设计

为了验证应用上述算法三维测量系统观测数据处理的精度, 采用 Leica TM5100A 电子经纬仪获取的观测数据, 并分别采用 Leica Axyz 工业测量数据处理软件和本文观测数据处理方式对相同观测值进行处理与对比。

观测目标为一个在垂直平面上布设的一个 3 行 3 列, 共计 9 个观测点的检校场, 如图 2 所示。点名按照由左至右, 由上至下的顺序命名为 B1—B9, 两相邻观测点间距约为 0.5 m。通过观测该检校场, 对积木式三维工业测量系统处理后的目标点坐标数据进行精度评定。测站及基准尺摆放条件与基准尺定向试验相同, 基线距观测目标点间水平距离约为 4.5 m。

4.2 数据处理结果分析

受定向方式的不同及点位坐标解算精度评定算法的不同, 可能造成所得的处理数据定向及点位坐标存在差异, 观测结果不宜直接进行对比。通过计算各组数据中每相邻两观测点间距, 并对各组间计算所得的点间距进行比较, 可对观测数据精度进行间接比较。

通过对比表 1 中两种方式下, 对于同一组观测数据分别解算出的相邻点之间的间距差异可知, 经采用本文中刚性坐标系下的光束法平差所获得的结果, 与采用柔性坐标系的 Leica Axyz 工业测量系统软件处理结果互差最大仅为 -0.010 mm, 具有同等数量级的观测精度。

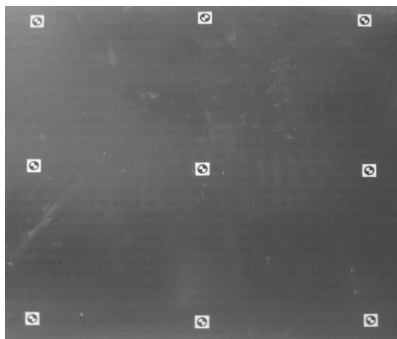


图 2 检校场观测点示意图

Fig. 2 The site of standardization

5 结束语

借助高精度仪器整平补偿技术,通过忽略仪器整平所造成的误差,建立了刚性测量坐标系,在满足同等观测精度的前提下,由于不需要测定各测站之间与仪器自身姿态相关的角度转换参数,极大地降低了工业测量数据处理中角度相关的计算量。经采用 TM5100A 电子经纬仪观测,并分别利用 Leica Axyz 工业测量系统软件和光束法数据处理方法对观测值进行处理验证。结果表明,所提出的方法满足工业测量观测要求。

参考文献:

[1] 李广云. 工业测量系统最新进展及应用[J]. 测绘工程, 2001, 10(2): 36-40.

LI Guanyun. The state of the art and applications of the industrial measuring systems[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2001, 10(2): 36-40.

[2] 冯文灏. 建立积木式三维工业测量系统的研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2002, 27(4): 403-407.

FENG Wenhao. Method for setting up a three-dimensional industrial surveying system of "building blocks type" [J]. Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 403-407.

[3] 李广云, 张良琚, 卫建东, 等. 光束法平差在工业测量系统 TSST 中的应用[J]. 解放军测绘学院学报, 1996, 13(2): 95-107.

LI Guangyun, ZHANG Liangju, WEI Jiandong, et al. The bundle adjustment method and its application in TSST industrial measuring system[J]. Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping, 1996, 13(2): 95-107.

[4] 黄桂平, 李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 256-260.

HUANG Guiping, LI Guangyun. Study of system orientation and coordinate calculation of IMS[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2003, 32(3): 256-260.

[5] 熊春宝. 工业大地测量系统无整平定向的自定位法[J]. 工程勘察, 1997(5): 55-58.

XIONG Chunbao. A self-locating method with non-levelling and non-orientating for industrial and geodetic measuring system [J]. Geotichinca Investigation and Surveying, 1997(5): 55-58.

[6] 朱肇光, 孙护, 崔炳光. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1995.

表 1 相邻点间距对比计算表

Tab. 1 The contrast calculation of distances

相邻点计算 点名	between adjacent points		系统间互差 mm
	相邻点间距		
	Leica Axyz	刚性坐标系	
B1-B2	509.787	509.795	-0.008
B2-B3	482.611	482.612	0.000
B4-B5	502.049	502.056	-0.008
B5-B6	494.126	494.125	0.001
B7-B8	504.018	504.026	-0.008
B8-B9	498.557	498.556	0.001
B1-B4	489.193	489.199	-0.006
B4-B7	508.730	508.736	-0.005
B2-B5	506.345	506.344	0.001
B5-B8	506.151	506.160	-0.010
B3-B6	501.239	501.245	-0.006
B6-B9	492.549	492.550	-0.001