

坐标转换解算中基于验前中误差的稳健估计

周跃寅, 潘国荣, 孙海丽

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要:通过公共点求解坐标转换参数时,如果公共坐标含有粗差,将会影响参数的求解,进而导致坐标转换结果产生较大的偏差。通过对比分析含粗差时的坐标中误差与验前中误差之间的比例关系,探究了坐标转换中利用离散的阈值函数与各点位较差的对比关系,判断是否含粗差,以及观测数据含粗差时,各个点位坐标较差与最大点位坐标较差的关系,并且通过权变换避免了有效坐标的权误置零的情况,通过大量数据验证了算法的有效性。

关键词:抗差估计;坐标转换;验前中误差;坐标中误差;点位坐标较差

中图分类号:P207

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)03-0069-08

Robust Estimation of Coordinate Transfer Based on Prior MSE

Zhou Yueyin, Pan Guorong, Sun Haili

(College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Outliers in common points greatly influence the calculation result to get the coordinate transformation parameters and result in large deviation of coordinate transfer. Comparative analysis was made on the multiple relations between the posteriori MSE of coordinate involving outliers and the priori MSE. The selection of threshold was studied in comparison with the point positional errors to judge whether there are outliers or not. Besides, the relationship among the point positional errors involving outliers with the max of point positional error was obtained. Weight transformation was used to avoid the risk of the observed weight of available coordinate value being wrongly set zero. Adequate test data verify the efficiency of this algorithm.

Key words: robust estimation; coordinate transfer; priori square error; mean square error of coordinate; point positional error

高斯最小二乘法是利用不含粗差而仅含有偶然误差的观测值,来求解最优无偏未知参数的方法。如果观测值含有粗差,仍用高斯最小二乘法求解则会使得求解参数严重失实,必须采用特殊处理。20世纪80年代以后,稳健估计(robust estimation)作为处理这类问题的方法才开始被引入到测量数据处理中^[1]。选权迭代法作为最常用的稳健估计方法,根据权函数定义的不同,又可细分为 Huber 法、丹麦法、Hampel 法、国内研究较多的李德仁的验后方差估计法^[2]和周江文的 IGG 法^[3](由中国科学院测量与地球物理研究所(Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences)提出的一种电力系统抗差估计方法,也称“多段分段法”)。文献[4]详细探究了利用稳健估计中的中位数法计算初始残差来解决空间大地基准转换中包含粗差情况的问题。文献[5]和文献[6]采用一种权函数分布区间随迭代次数变化的权函数进行选权迭代,分别解算道路线形参数和椭圆参数,但其中迭代次数是根据特定数据人为给定,合理性不够。

收稿日期:2013-03-11

基金项目:高等学校博士学科点专项基金(博导类)项目(20120072110049);精密工程与工业测量国家测绘局重点实验室项目(PF2011-16)

作者简介:周跃寅(1987—),男,陕西咸阳人,博士研究生,主要从事工业测量数据融合处理等方面的研究。

E-mail:ag-yue@163.com

坐标转换,又称为三维基准转换,在工程测量、摄影测量等诸多测量领域有着广泛的应用。当其中的数据含有较大误差或粗差时,转换结果极易受其影响,因此需要将稳健估计的相关算法引入到坐标转换中去。文献[9]通过引入自适应调节因子矩阵,降低含粗差观测值的权,但是该调节因子随不同控制网取不同的数值,应用中需区别对待;文献[10]利用阻尼最小原理进行三维直角坐标转换,并通过选权迭代法获得转换参数,但其粗差对结果的影响并不能完全剔除。

本研究基于空间直角坐标转换参数的求解,提出了一种新的不等权抗差估计算法。不含粗差的观测值中误差应该与验前中误差相近,如果验后观测值中误差大于验前中误差一定量以上,则观测值很有可能含有粗差。通过研究解算的验后坐标中误差与验前点位中误差的倍数关系,确定一个离散阈值函数的大小,再用各点位较差与之比较来判断各点是否含粗差,并且采用类似数字图像处理中灰度变换算法进行权变换,避免随着迭代的不断进行,观测值之间的权之比逐渐拉大最终导致求解参数的法方程奇异,进而无法求出最优解的问题;同时,为了提高粗差提取效率,研究了含粗差点点位的坐标较差与最大点位坐标较差之间的倍数关系,并通过求解多组含不同粗差的数据解算坐标转换参数,均取得了优良的剔除粗差的结果,验证了算法的稳定性。

1 理论模型

1.1 空间直角坐标转换模型

两空间直角坐标系之间转换独立参数包含 7 个,分别是 3 个平移参数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, 3 个旋转角参数 α, β, γ 以及 1 个尺度参数 μ , 从原始坐标系的坐标 $[X \ Y \ Z]_{\text{origin}}^T$ 到目标坐标系的坐标 $[X \ Y \ Z]_{\text{target}}^T$ 有如下数学模型关系^[7-8]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{target}} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + \mu) \times \mathbf{R}_X(\alpha) \times \mathbf{R}_Y(\beta) \times \mathbf{R}_Z(\gamma) \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{origin}} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{R}_X(\alpha), \mathbf{R}_Y(\beta), \mathbf{R}_Z(\gamma)$ 分别是两直角坐标系绕 X, Y, Z 轴的旋转矩阵,文献[7-8]详细阐述了将式(1)线性化,并采用最小二乘法解算的过程,另一种 13 参数坐标转换的对比,这里不再赘述。

由于式(1)为非线性数学模型,采用间接平差式需从哈定的参数近似值出发,不断迭代求解出参数改正数并更新参数近似值,第一次解算参数时权阵为单位阵,解算的点位坐标中误差为 $\sigma_0 = \sqrt{3} \times \sqrt{\mathbf{V}_0^T \cdot \mathbf{V}_0 / (3 \times n - 7)}$, 如果记 \mathbf{V}_0 为第一次解算独立 7 参数的残差向量, n 为参与解算点的个数,第一次解算得到的独立 7 参数为 $\Delta \bar{x}_0, \Delta \bar{y}_0, \Delta \bar{z}_0, \bar{\alpha}_0, \bar{\beta}_0, \bar{\gamma}_0, \bar{\mu}_0$, 并且坐标观测值中没有粗差,仅含有偶然误差,得到的即为最小二乘解的最优解;本文仅考虑目标坐标系中的误差,而如果考虑原始坐标系的误差,则为整体最小二乘的范畴。如果坐标观测值中有粗差,则会导致得出的解偏离最优解,并最终带来坐标转换的偏差,因此需要通过某种方法判断坐标观测值是否含有粗差并且将含有粗差的坐标观测值剔除。

1.2 不等权抗差估计新方法

用上述第一次解算出的 7 个参数得到一组解算的目标坐标系坐标:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{calculate}} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_0 \\ \Delta \bar{y}_0 \\ \Delta \bar{z}_0 \end{bmatrix} + (1 + \bar{\mu}_0) \times \mathbf{R}_X(\bar{\alpha}_0) \times \mathbf{R}_Y(\bar{\beta}_0) \times \mathbf{R}_Z(\bar{\gamma}_0) \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{origin}} \quad ; \quad (2)$$

进而可以得到各参与平差解算点的残差:

$$\begin{bmatrix} \delta_{x_i} \\ \delta_{y_i} \\ \delta_{z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{\text{calculate}} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}_{\text{target}} \quad ; \quad (3)$$

$$\delta_i = \sqrt{\delta_{x_i}^2 + \delta_{y_i}^2 + \delta_{z_i}^2} \quad (4)$$

其中: δ_i 即为利用各向残差 $\delta_{x_i}, \delta_{y_i}, \delta_{z_i}$ 求得的该点的点位坐标较差。每个参与迭代解算点各向的权确定

如下:

$$P_i = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \sigma_{0_x}^2 / \delta_{x_i}^2 \\ \sigma_{0_y}^2 / \delta_{y_i}^2 \\ \sigma_{0_z}^2 / \delta_{z_i}^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: $\sigma_{0_x}, \sigma_{0_y}, \sigma_{0_z}$ 分别为点位验前中误差 σ_0 各向的分量, $i=1, 2, \dots, n$ 表示点序号。实际应用中可以利用仪器标称的测距精度、测角精度, 通过误差传播解算出各点在直角坐标系中各方向的验前中误差。这些点中如果包含有粗差点, 则需将粗差点的权 P_i 置零, 以达到淘汰粗差点、不参与平差解算的目的, 因此保留了最小二乘处理仅含偶然误差的优良特性。

可以看出, 各向残差作为分母时, 如果残差越小, 则该点权越大, 不断循环下去如不做处理将会出现某一点的权越来越大, 并趋于无穷, 而其他有效点的权越来越小趋于零, 所以这里需要做进一步处理, 在 1.3 中会有介绍。而本文判别是否含有粗差点采用以下方法:

1) 获取最大点位坐标较差 δ_{\max} :

$$\delta_{\max} = \max\{\delta_i\}; \quad (6)$$

2) 确定阈值 $H(\bar{\sigma}_j)$:

阈值 $H(\bar{\sigma}_j)$ 是跟验前中误差有关的离散函数, $\bar{\sigma}_j$ 为第 j 次迭代解算的点位坐标中误差, 函数模型如下:

$$H(\bar{\sigma}_j) = \begin{cases} 3\bar{\sigma}_j, \bar{\sigma}_j < k_0 \times \sigma_0 \\ \bar{\sigma}_j, \bar{\sigma}_j \geq k_0 \times \sigma_0 \end{cases}. \quad (7)$$

其中: k_0 一般取 1.5, 即将解算的坐标中误差与 1.5 倍验前坐标中误差进行比较。

3) 根据 δ_{\max} 和阈值 $H(\bar{\sigma}_j)$ 的关系判断含粗差点。

如果 $\delta_{\max} > H(\bar{\sigma}_j)$, 则说明观测点中含有粗差, 那么在第 j 次迭代中各点位较差满足 $\delta_{ij} > k_1 \times \delta_{\max}$ 的点都含有粗差, 否则不含粗差。这里 k_1 一般取 $\frac{2}{3}$ 。如此可一次同时剔除多个含粗差点, 提高剔除粗差的效率。

通过不同实验对比分析, 利用给定本文中的 k_0 和 k_1 值可以准确剔除粗差。利用含粗差的坐标观测值进行平差解算, 得到的坐标中误差都比验前中误差大很多, 随着粗差的逐步剔除, 解算得到的坐标中误差逐渐减小, 最终逼近验前中误差。当解算的坐标中误差小于 $k_0 = 1.5$ 倍验前点位中误差时, 可看作是近似符合不含粗差的情况, 若此时仍有点位较差出现大于 3 倍坐标中误差的情况则被视为粗差; 而当解算的坐标中误差大于 $k_0 = 1.5$ 倍验前中误差时, 一般都是含有粗差的, 此时根据式(7)的阈值和各点位坐标较差来提取含粗差的点。当检测出最大点位坐标较差是含有粗差的情况下, 各点位较差大于最大点位较差 k_1 倍的都是含有粗差的点。

通过式(2)~(5)定权, 采用高斯最小二乘法进行迭代求解, 通过上述判别方法将含粗差点的权置零来淘汰粗差, 当第 j 次解算出的各点坐标较差 δ_{ij} 与上一次解算出的各点坐标较差 $\delta_{i,j-1}$ 之差的最大值小于某一特定小量 ϵ 时, 即可认为参数解稳定并已经将粗差剔除。解算参数公式如下:

$$V_j = A \times \bar{X}_j - l; \quad (8)$$

$$\bar{X}_j = (A^T \times \bar{P}_j \times A)^{-1} \times (A^T \times \bar{P}_j \times l). \quad (9)$$

其中: A 为公式(1)带入观测值的线性化系数矩阵, l 为常数项, \bar{P}_j 为利用公式(5)中的权值经过权变换解算的等价权, 在 1.3 中有详细说明, $\bar{X}_j = [\Delta \bar{x}_j \quad \Delta \bar{y}_j \quad \Delta \bar{z}_j \quad \bar{\alpha}_j \quad \bar{\beta}_j \quad \bar{\gamma}_j \quad \bar{\mu}_j]^T$ 为第 j 次求解的转换参数, 带粗差点对应的权为 0。

此外, 第 j 次解算坐标中误差 $\bar{\sigma}_j = \sqrt{3 \times \sqrt{V_j^T \times P_j \times V_j} / (3 \times n - 7)}$ 中, n 是排除了已剔除粗差的点的个数。

1.3 权变换

此类用验前中误差与点位较差作比较的方法定权在迭代解算时, 由于点位较差作为分母, 会出现某些点的权值被不断放大, 而另一些点的权值则不断减小逼近 0, 解算出的模型不断停靠在某些有限点构成的坐标转换模型, 而其他没粗差的点的权因为逼近 0 而近乎被淘汰掉, 有时甚至会出现仅有一个点的权值逼近无

穷,其他所有点的权值逼近 0 的情况,造成解算所需的必要观测值个数不足,这时是无法求解出空间直角坐标转换参数的。这显然不是希望得到的结果,因此采用一种类似数字图象处理中灰度变换的算法,将权值重排,把权值的范围限定在某一个区域内,避免上述问题的发生,也是一种等价权的处理方法。

在原始权矩阵 \mathbf{P} 中, P_i 为矩阵中第 i 个元素,定义 $P_{\max} = \max\{P_i\}$, $P_{\min} = \min\{P_i\}$, P_{upper} 为将要设定的权上限, P_{lower} 为将要设定的权下限,则经过权变换之后的等价权为:

$$\bar{P}_i = P_{\text{lower}} + \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \times (P_{\text{upper}} - P_{\text{lower}}) \quad (10)$$

经过这个过程,就可以将原本可能差异很大的各权值缩小到 $P_{\text{lower}} \sim P_{\text{upper}}$,并且不失原观测值之间权的相对关系,通常可以将下限 P_{lower} 为 1,上限 P_{upper} 定为 5~10,进而由元素 \bar{P}_i 组成公式(9)中的权阵 $\bar{\mathbf{P}}$ 。

2 实验数据分析

某一测站下的 12 个目标点,原始坐标如表 1 所示。模拟出这 12 个点在目标坐标系中的坐标,设定从原始坐标系到目标坐标系间的转换参数如表 2 所示。

表 1 原始坐标系的 12 个点三维坐标表

Tab. 1 The original 3-dimensional coordinates of 12 points

点号	1	2	3	4	5	6
x	-5.608 1	-7.220 2	9.564 0	19.606 6	22.346 3	10.612 6
y	-1.826 1	-10.857 2	-21.298 0	-21.231 8	-12.146 5	1.118 4
z	-0.114 3	-0.079 5	0.441 5	-0.021 4	-0.444 9	-1.338 7
点号	7	8	9	10	11	12
x	-11.494 3	-11.136 9	21.435 1	26.124 4	27.634 5	27.451 0
y	-1.758 8	-15.055 0	-25.568 0	-23.906 5	-13.876 4	-6.551 9
z	-0.337 0	-0.235 3	-0.201 1	-0.272 6	-1.170 7	-1.483 0

表 2 模拟从原始坐标系到目标坐标系的转换参数表

Tab. 2 Simulation parameters from origin to target

参数	$\Delta x / \text{m}$	$\Delta y / \text{m}$	$\Delta z / \text{m}$	α / rad	β / rad	γ / rad	μ
数值	10	10	10	0.01	0.01	0.03	0.01

从原始坐标和转换参数可以得到目标坐标系中的坐标,再在目标坐标系中每个点各方向加上一定误差 Δ ,服从 $\Delta \sim N(0, 1 \text{ mm}^2)$ 的正态分布,即验前点位中误差 $\sigma_0 = \sqrt{3 \times D(\Delta)} = 1.732 \text{ mm}$,表 3 是一组模拟目标坐标系带有如上观测误差的点坐标。

表 3 目标坐标系的 12 个点三维坐标表

Tab. 3 The target 3-dimensional coordinates of 12 points

点号	1	2	3	4	5	6
x	4.286 2	2.382 9	19.003 0	29.148 9	32.196 4	20.759 7
y	8.327 6	-0.742 3	-11.783 2	-12.026 7	-2.941 5	10.794 8
z	9.842 6	9.951 5	10.754 2	10.390 2	9.900 7	8.748 6
点号	7	8	9	10	11	12
x	-1.652 4	-1.696 2	30.867 5	35.649 0	37.488 1	37.526 9
y	8.569 2	-4.864 4	-16.459 4	-14.927 1	-4.854 7	2.541 2
z	9.557 7	9.793 7	10.270 2	10.230 2	9.239 2	8.851 6

由这两套坐标系 12 个点的坐标通过本文提出的算法解算出转换参数,12 个点全部参与平差且没有粗差点淘汰,参数如表 4 所示。

表 4 不含粗差解算两坐标系转换参数表

Tab. 4 Calculated transfer parameters with no outliers involved

参数	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/m$	μ
数值	10.000 527	10.000 556	9.999 797	0.009 993 223 9
参数	α/rad	β/rad	γ/rad	$\bar{\sigma}/\text{mm}$
数值	0.010 011 283 2	0.009 981 684 8	0.030 048 372 9	1.128

为了验证算法的可靠性,在模拟的目标坐标系各点分别加上不同的粗差。根据误差理论及实践证明,在大量同精度观测的一组误差中,绝对值大于 3 倍中误差的偶然误差出现的概率为 0.3%,因此在如上模拟数据情况下,我们认为,当点位坐标较差大于 3 倍验前点位坐标中误差时,即大于 5.196 mm 点位坐标较差的点都含有粗差。通过各种实验数据显示,该算法具有良好的自动抗粗差和平差效果。

2.1 少量不显著粗差的剔除

以第二点为例,仅在第二点的 x 加上 8 mm 的粗差,通过用本文算法第一次迭代前得到的各项指标的图示如图 1 所示。

由图 1 可以看出,第一次迭代前解算的观测值中误差大于 $k_0 = 1.5$ 倍验前中误差,这时采用阈值函数 $H(\bar{\sigma}_j) = \bar{\sigma}_j$ 。若最大点位较差在坐标中误差值以上,那么所有大于 $k_1 = \frac{2}{3}$ 倍最大点位较差的点都含有粗差,2 号点作为粗差被剔除。图 2 是跳出迭代前各指标。

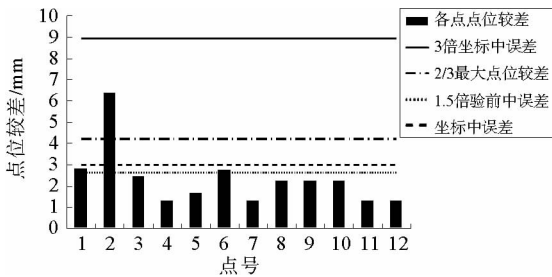


图 1 第二点加上 8 mm 粗差迭代前各指标值图

Fig. 1 Indexes before iteration under the condition of P2 with 8 mm outliers

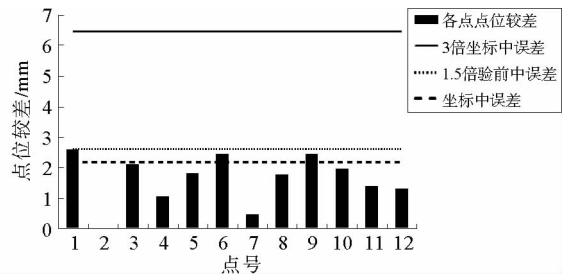


图 2 第二点加上 8 mm 粗差跳出迭代前各指标值图

Fig. 2 Indexes before exiting iteration under the condition of P2 with 8 mm outliers

此时解算的验后坐标中误差小于 1.5 倍验前中误差,因而应该选择的阈值函数为 $H(\bar{\sigma}_j) = 3 \times \bar{\sigma}_j$,即图 2 中实线作为阈值,若最大点位较差大于此值则含有粗差,从图 2 可以看出没有任何较差符合,即不继续剔除粗差点。此时 2 号点已被剔除,不参与平差以及点位较差的统计,最终得到的转换参数如表 5 所示。

表 5 剔除第二点的两坐标系转换参数表

Tab. 5 Calculated transfer parameters without Point 2

参数	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta y/m$	μ
数值	10.000 621	10.000 536	9.999 717	0.009 990 101 8
参数	α/rad	β/rad	γ/rad	$\bar{\sigma}/\text{mm}$
数值	0.010 010 214 4	0.009 986 934 2	0.030 049 432 6	1.187

2.2 大量粗差的剔除

本算法是通过迭代逐步剔除粗差的,并不是一次就将所有粗差淘汰掉,当含有大量粗差时,基本按粗差的大小顺序依次剔除掉。仍以本实验数据为例,第二点 x 加 2 cm,三点 y 加 3 cm,第四点 z 加 4 cm,第五点 x 加 2 cm,第六点 y 加 1 cm,在该算法迭代之前各指标值如图 3 所示。

由图 3 可以看出,第一次迭代前解算的坐标中误差大于 $k_0 = 1.5$ 倍验前中误差,这时采用阈值函数 $H(\bar{\sigma}_j) = \bar{\sigma}_j$,最大点位较差在验后坐标中误差以上,那么大于 $k_1 = 2/3$ 倍最大点位较差的点都含有粗差,因此剔除了 3 号点和 4 号点。

淘汰 3 号点和 4 号点后第二次迭代前各指标值如图 4 所示。

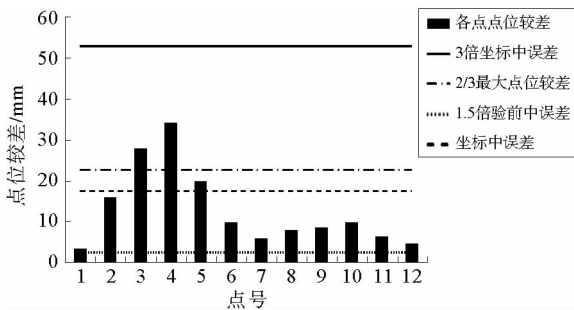


图 3 包含大量各种粗差迭代前各指标值图

Fig. 3 Indexes before iteration under the condition of involving various outliers

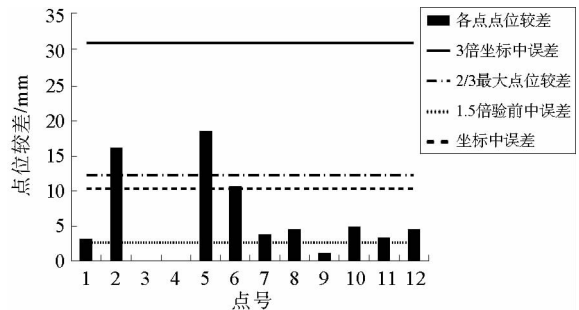


图 4 第二次迭代前各指标值图

Fig. 4 Indexes before the second iteration

由图 4 可以看出,坐标中误差仍然大于 1.5 倍验前中误差,而且最大较差大于此时阈值函数 $H(\bar{\sigma}_j) = \bar{\sigma}_j$,本算法因此剔除了在点画线以上的 2 号点和 5 号点。

淘汰 2 号点和 5 号点后第三次迭代前各指标值如图 5 所示。

由图 5 可以看出,此时的观测值中误差大于 1.5 倍验前中误差,因此阈值函数仍然取 $H(\bar{\sigma}_j) = \bar{\sigma}_j$,而且最大较差仍大于此阈值(即仍在验后坐标中误差以上),所以按照此时大于 $2/3$ 倍最大点位较差的点都含有粗差这一法则,淘汰 6 号点。

在剔除了 6 号点之后第四次迭代前,各项指标值如图 6 所示。

由图 6 可以看出,验后坐标中误差已经小于 1.5 倍验前中误差了,阈值选定 $H(\bar{\sigma}_j) = 3 \times \bar{\sigma}_j$,即实线位置。按本算法不再继续剔除粗差点,即认为目前平差所用到的观测值不含粗差。在满足迭代条件,当第 j 次解算出的各点较差 δ_{ij} 与上一次解算出的各点较差 $\delta_{i,j-1}$ 之差的最大值小于某一值(本算法设定限差为 1 mm)时,跳出循环,解算结束。

最终得到的转换参数如表 6 所示。

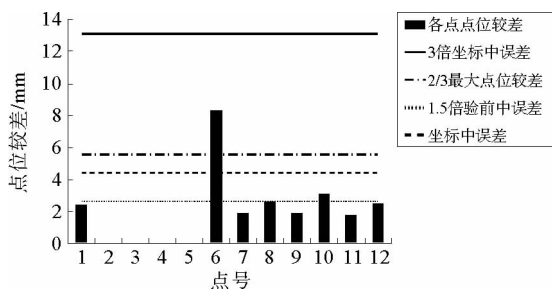


图 5 第三次迭代前各指标值图

Fig. 5 Indexes before the third iteration

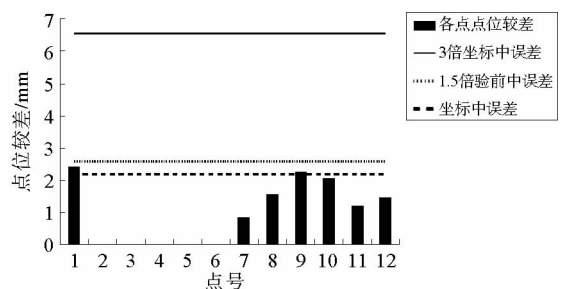


图 6 第四次迭代前各指标值图

Fig. 6 Indexes before the fourth iteration

表 6 剔除含大量各种粗差的两坐标系转换参数表
Tab. 6 Calculated transfer parameters without involving various outliers

参数	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/m$	μ
数值	10.000 856	10.000 497	9.999 182	0.009 987 007 0
参数	α/rad	β/rad	γ/rad	σ/mm
数值	0.010 028 315 7	0.009 987 301 1	0.030 048 173 5	1.254

由表 6 可以看出,本算法在粗差剔除上是非常有效并且易于实现的。

对比文献[5-6]的中权函数区间的选择,是根据迭代次数而定的,不具有普遍性,而本文则根据解算出的验后坐标中误差与验前中误差的关系自动判定阈值的选取;此外权的选择也根据点各向较差确定,而不是统一按等权处理,更具合理性与普遍性。

3 结论

通过大量数据验证了利用本文提出的两个参数 k_0, k_1 以及判别粗差的阈值函数 $H(\bar{\sigma}_j)$,能够准确自动判别粗差并将粗差剔除,通过权变换将观测值的权分配到合理区间,得到本算法的等价权,避免了随着迭代的进行误将不含粗差观测值的权置零。另外本算法的实现需要知道较准确的验前中误差,通常在实际应用中可以利用不同仪器的先验精度,通过误差传播理论解算出观测值残差的验前中误差。

从大量实验数据中列举了 2 个有代表性的实验数据,以坐标转换模型为基础,通过解算可以清楚地看出每一步剔除粗差的过程,同时验证了算法的准确性,基本涵盖了其他含粗差数据剔除的规律,在程序编写上也较方便,为将抗差估计应用于坐标转换的相关理论,提供了一种新的视角。鉴于坐标转换的特点,本文没有直接利用各向的残差进行比较而是利用点位坐标较差进行比较,在其他测量数据处理中也可灵活借鉴。

参考文献:

[1]刘大杰,陶本藻.实用测量数据处理方法[M].北京:测绘出版社,2000:22-27.

[2]李德仁.利用选权迭代法进行粗差探测定位[J].武汉测绘科技大学学报,1984,9(1):46-68.
Li Deren. Gross error detection and position based on selecting wight iteration method[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping,1984,9(1):46-68.

[3]周江文.经典误差理论与抗差估计[J].测绘学报,1989,18(2):115-120.
Zhou Jiangwen. Classical theory of error and robust estimation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,1989,18(2):115-120.

[4]Yang Y. Robust estimation of geodetic datum transformation[J]. Journal of Geodesy,1999,73(5):268-274

[5]姚连璧.应用稳健估计方法计算道路线形参数[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(11):1350-1354.
Yao Lianbi. Algorithm for road alignment parameter calculation with robust estimation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2002,30(11):1350-1354.

[6]许正文,姚连璧.基于稳健估计的直接最小二乘椭圆拟合[J].大地测量与地球动力学,2008,28(1):77-80.
Xu Zhengwen, Yao Lianbi. Direct least square robust estimation method for ellipse fitting[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2008,28(1):77-80.

[7]潘国荣,周跃寅.两种坐标系转换计算方法的比较[J].大地测量与地球动力学,2011,31(3):58-62.
Pan Guorong, Zhou Yueyin. The comparison of two ways of calculation on coordinate transfer[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2011,31(3):58-62.

[8]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):1101-1105.
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):1101-1105.

[9]郭英起,黄声享,曹先革.基于稳健估计的高精度坐标转换参数解算方法[J].测绘工程,2008,17(6):6-8.
Guo Yingqi, Huang Shengxiang, Cao Xiangge. Method of calculating parameters with high accuracy in coordinate transforma-

tion based on robust estimation[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2008, 17(6): 6-8.

[10] 罗长林, 张正禄, 梅文胜, 等. 三维直角坐标转换的一种阻尼最小二乘稳健估计方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(8): 707-710.

Luo Changlin, Zhang Zhenglu, Mei Wensheng, et al. A damped least square robust estimation method for spatial three-dimensional rectangular coordinate transformation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(8): 707-710.

(责任编辑: 高丽华)

“测绘·遥感·信息”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇ 航空航天摄影测量
- ◇ 遥感影像信息处理
- ◇ 精密空间定位
- ◇ 海岛(礁)测绘
- ◇ 地球空间信息系统
- ◇ 3S集成与空间信息服务
- ◇ 精密工程测量与工业测量
- ◇ 多媒体通讯技术

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“测绘遥感信息”研究专栏。稿件通过专家评审后优先发表, 优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkglhxx@163.com, glhxx@163.com

联系电话: 0532-86057859

山东科技大学学报(自然科学版) 编辑部