

三维激光扫描影像拼接模型及试验分析

郑德华

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :从理论上推导了基于土木工程应用的三维激光扫描影像拼接模型 ,并提出了运用附有限制条件的间接平差模型解算拼接模型的数学方法 .在试验研究中 ,通过三维激光影像扫描仪和全站仪采集了相应的试验数据 ,应用附有限制条件的间接平差模型算法进行了编程计算 .同时还分析了考虑尺度因子的拼接模型的合理性 .结果表明 :拼接模型的解算方法合理有效 ;当设置的激光扫描脚点间隔为 18 mm 时 ,激光扫描脚点间隔对拼接模型精度的影响显著 .

关键词 :三维激光扫描影像 ;拼接模型 ;限制条件 ;间接平差模型 ;旋转角的精度 ;尺度因子

中图分类号 :P228 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2005)04- 0466- 06

在三维激光扫描数据处理过程中 ,点云数据的合并是极为重要的一个环节 .通过激光扫描点云数据的合并 ,可完成扫描对象的拼接 .在数据拼接中 ,转换的精度会直接影响到模型的质量和使用 .目前 ,地面三维激光扫描技术主要应用于逆向工程和工业设备的设计制造及检测 ,而在土木工程测量中的应用较少^[1] .在以工业设备为对象的三维激光扫描测量中 ,数据合并主要采用迭代最近点法(ICP 算法)^[2] .该方法对于工业设备及其模具等具有光滑自由曲面的表面 ,可以取得很好的效果^[3] .在土木工程中 ,三维激光扫描对象具有光滑自由曲面的较少 ,但可根据公共特征点进行扫描对象的拼接 .此外 ,应用于大地测量、摄影测量及工程测量领域中的空间直角坐标转换模型主要为小角度旋转模型 ,如布尔沙模型、莫洛金斯基模型和武测模型等^[4] .在土木工程三维扫描点云数据的合并中 ,空间直角转换的 3 个欧拉角通常是任意大小的角度 ,故应采用严密的大旋转角空间直角坐标转换模型 .

1 三维激光扫描影像的拼接模型

1.1 坐标轴旋转原理

在 2 个同为左手系(或右手系)的三维直角坐标系旋转中 ,通过连续旋转 3 个坐标轴使旋转坐标系的 3 个轴向与参考坐标系的轴向相一致 .坐标轴旋转角可定义为 ,从坐标轴正向看 ,围绕坐标轴逆时针旋转的角度 ,旋转角的范围为 0° ~ 360° .坐标系统 z 轴旋转 C 角后 ,可得到关系式

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(C) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \qquad R(C) = \begin{bmatrix} \cos C & \sin C & 0 \\ -\sin C & \cos C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)$$

式中 $R(C)$ 为坐标系统 z 轴旋转 C 角的旋转矩阵 .同理可得 ,坐标系统 y 轴旋转 B 角、绕 x 轴旋转 A 角的旋转矩阵 $R(B)$ 和 $R(A)$.

1.2 扫描影像数据拼接的数学模型

三维激光扫描数据点的空间旋转 ,即将旋转系 O_{xyz} 分别绕自身的 3 个坐标轴旋转后 ,再将旋转系的原点平移到参考系 $OXYZ$ 的原点上 .当考虑 2 种坐标系的尺度差时 ,需增加 1 个尺度因子 .因此 ,根据以上主要过程可建立大转角 7 独立参数模型

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \mu R(A, B, C) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

该合并转换模型包含 3 个平移参数 X_0, Y_0, Z_0 ,1 个尺度参数 μ 和 3 个大角度旋转参数 A, B, C .通过大转角转换模型可以将旋转系 O_{xyz} 中的三维激光扫描数据点坐标 (x, y, z) 转换到参考系 $OXYZ$ 中.

若旋转的 3 个坐标轴次序为 z 轴、 y 轴、 x 轴,则由 $R(A), R(B)$ 和 $R(C)$ 可得三维旋转矩阵的一种具体形式

$$R(A, B, C) = \begin{bmatrix} \cos B \cos C & \cos B \sin C & \sin B \\ -\cos A \sin C - \sin A \sin B \cos C & \cos A \cos C - \sin A \sin B \sin C & \sin A \cos B \\ \sin A \sin C - \cos A \sin B \cos C & -\sin A \cos C - \cos A \sin B \sin C & \cos A \cos B \end{bmatrix} \quad (3)$$

$R(A, B, C)$ 可用方向余弦表示为

$$R(A, B, C) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

三维直角坐标系绕自身坐标轴旋转属于初等正交变换,则 $R(C), R(B)$ 和 $R(A), R(A, B, C)$ 都是正交矩阵.正交矩阵中的任何 1 列或 1 行所构成的向量的模为 1,任何 2 列或 2 行所构成的 2 个向量的点乘积为 0^[5].根据正交矩阵的性质,旋转矩阵的 9 个方向余弦之间存在以下 6 条非线性关系式:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 a_{ij}^2 = 1 & (j = 1, 2, 3) \\ \sum_{i=1}^3 a_{ij}a_{ik} = 0 & (j = 1, 2, 3; k = 2, 3; j \neq k) \end{cases} \quad (5)$$

1.3 扫描影像数据拼接模型的解算

实现 2 幅 3D 影像图的点云数据合并,关键在于精确地解算出式(2)的 7 个参数($X_0, Y_0, Z_0, \mu, A, B, C$).在这 7 个参数中,3 个大角度旋转参数 A, B, C 与其他变量之间是非线性的三角函数关系,所以直接解算非线性转换模型中的 7 个参数是比较复杂的.为了将式(2)转化为线性转换模型,将式(4)代入式(2)并将三维旋转矩阵中的 9 个方向余弦视为未知参数.将 13 个参数($X_0, Y_0, Z_0, \mu, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}$)用级数展开就得到线性转换模型的误差方程式

$$V_i = B_i \hat{x} - L_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{11}^0 x_i + a_{12}^0 y_i + a_{13}^0 z_i & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_{21}^0 x_i + a_{22}^0 y_i + a_{23}^0 z_i & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_{31}^0 x_i + a_{32}^0 y_i + a_{33}^0 z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu^0 x_i & \mu^0 y_i & \mu^0 z_i \end{bmatrix}$$
$$\hat{x} = [dX_0 \quad dY_0 \quad dZ_0 \quad d\mu \quad da_{11} \quad da_{12} \quad da_{13} \quad da_{21} \quad da_{22} \quad da_{23} \quad da_{31} \quad da_{32} \quad da_{33}]^T$$
$$L_i = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} X_0^0 \\ Y_0^0 \\ Z_0^0 \end{bmatrix} - \mu^0 \begin{bmatrix} a_{11}^0 & a_{12}^0 & a_{13}^0 \\ a_{21}^0 & a_{22}^0 & a_{23}^0 \\ a_{31}^0 & a_{32}^0 & a_{33}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i$$

以上各项中的 $X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \mu^0, a_{11}^0, a_{12}^0, a_{13}^0, a_{21}^0, a_{22}^0, a_{23}^0, a_{31}^0, a_{32}^0, a_{33}^0$ 分别表示 3 个平移参数、1 个尺度参数和 9

个方向余弦的近似值.

根据式(5)可写出 9 个方向余弦之间的关系式. 这 9 个关系式可作为平差模型的 6 个约束条件:

$$C\hat{x} - W_x = 0 \tag{7}$$

式中

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 2a_{11}^0 & 2a_{12}^0 & 2a_{13}^0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2a_{21}^0 & 2a_{22}^0 & 2a_{23}^0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2a_{31}^0 & 2a_{32}^0 & 2a_{33}^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{12}^0 & a_{11}^0 & 0 & a_{22}^0 & a_{21}^0 & 0 & a_{32}^0 & a_{31}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{13}^0 & 0 & a_{11}^0 & a_{23}^0 & 0 & a_{21}^0 & a_{33}^0 & 0 & a_{31}^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{13}^0 & a_{12}^0 & 0 & a_{23}^0 & a_{22}^0 & 0 & a_{33}^0 & a_{32}^0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$W_x = \begin{bmatrix} 1 - a_{11}^{02} - a_{12}^{02} - a_{13}^{02} \\ 1 - a_{21}^{02} - a_{22}^{02} - a_{23}^{02} \\ 1 - a_{31}^{02} - a_{32}^{02} - a_{33}^{02} \\ -(a_{11}^0 a_{12}^0 + a_{21}^0 a_{22}^0 + a_{31}^0 a_{32}^0) \\ -(a_{11}^0 a_{13}^0 + a_{21}^0 a_{23}^0 + a_{31}^0 a_{33}^0) \\ -(a_{12}^0 a_{13}^0 + a_{22}^0 a_{23}^0 + a_{32}^0 a_{33}^0) \end{bmatrix}$$

由式(6)和式(7)组成附有限制条件的间接平差模型^[6]. 对于同一激光扫描仪获得的三维影像点云数据, 在转换中若不考虑尺度的影响, 则在平差模型的限制条件中增加 1 个约束条件 $d\mu = \alpha$ (μ^0 初值取为 1). 平差模型通过迭代计算, 就可解算坐标转换模型参数 $\hat{x}$ 、协因素阵 $Q_{\hat{x}\hat{x}}$ 以及单位权中误差 σ . 解出转换模型中的 13 个参数后, 以式(3)和式(4)中旋转矩阵元素建立对应关系, 就可解出转换模型中的 3 个旋转角 A, B, C .

2 三维激光扫描数据转换的旋转角方差分析

根据附有条件的间接平差原理, 可以得到转换参数的协因素阵 $Q_{\hat{x}\hat{x}}$ ^[6]

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = N_{bb}^{-1} - N_{bb}^{-1} C^T N_{cc}^{-1} N_{bb}^{-1} \tag{8}$$

式中 $N_{bb} = B^T P B$; $N_{cc} = C N_{bb}^{-1} C^T$.

根据式(3)和式(4), 可以得到旋转矩阵方向余弦与旋转角之间的微分关系式

$$\begin{bmatrix} da_{11} \\ da_{33} \end{bmatrix}_{9 \times 1} = H \begin{bmatrix} dA \\ dB \\ dC \end{bmatrix}_{3 \times 1} \tag{9}$$

式中

$$H = \begin{bmatrix} 0 & -\sin B \cos C & -\cos B \sin C \\ 0 & -\sin B \sin C & \cos B \cos C \\ 0 & \cos B & 0 \\ \sin A \sin C - \cos A \sin B \cos C & -\sin A \cos B \cos C & -\cos A \cos C + \sin A \sin B \sin C \\ -\sin A \cos C - \cos A \sin B \sin C & -\sin A \cos B \sin C & -\cos A \sin C - \sin A \sin B \cos C \\ \cos A \cos B & -\sin A \sin B & 0 \\ \cos A \sin C + \sin A \sin B \cos C & -\cos A \cos B \cos C & \sin A \cos C + \cos A \sin B \sin C \\ -\cos A \cos C + \sin A \sin B \sin C & -\cos A \cos B \sin C & \sin A \sin C - \cos A \sin B \cos C \\ -\sin A \cos B & -\cos A \sin B & 0 \end{bmatrix}$$

式(9)存在逆函数

$$\begin{bmatrix} dA \\ dB \\ dC \end{bmatrix}_{3 \times 1} = F \begin{bmatrix} da_{11} \\ \\ da_{33} \end{bmatrix}_{9 \times 1} \tag{10}$$

则 F 为 H 的 Moore-Penrose 广义逆. 根据 Moore-Penrose 广义逆的 4 个关系式, 得到

$$F = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{\sin B \sin C}{\cos B} & -\frac{\sin B \cos C}{\cos B} & 0 & \sin A \sin C & -\sin A \cos C \\ -\sin B \cos C & -\sin B \sin C & \cos B & -\sin A \cos B \cos C & -\sin A \cos B \sin C \\ -\frac{\sin C}{\cos B} & \frac{\cos C}{\cos B} & 0 & -\cos A \cos C & -\cos A \sin C \\ \frac{\cos A}{\cos B} & \cos A \sin C & -\cos A \cos C & -\frac{\sin A}{\cos B} & \\ -\sin A \sin B & -\cos A \cos B \cos C & -\cos A \cos B \sin C & -\cos A \sin B & \\ -\frac{\cos A \sin B}{\cos B} & \sin A \cos C & \sin A \sin C & \frac{\sin A \sin B}{\cos B} \end{bmatrix} \tag{11}$$

从 $Q_{\hat{x}}$ 取出旋转矩阵方向余弦的协因素阵 Q_{aa} . 根据误差传播定律, 可以得到 3 个旋转角的协因素阵 Q_{ABC} 和方差阵 D_{ABC} :

$$Q_{ABC} = FQ_{aa}F^T \qquad D_{ABC} = \sigma^2 Q_{ABC} \tag{12}$$

3 应用算例

3.1 试验数据采集

采用三维激光扫描仪对同济大学广场西侧的房屋和人行道进行了扫描. 数据采集时, 仪器距扫描目标平均距离为 31 m, 扫描仪到激光点的测距误差约 3 mm^[7]. 共扫描 847 行, 每行采集 1 081 个点, 扫描的平均间隔为 18 mm, 共采集了 915 607 个三维坐标点的点云数据. 原始数据经过校正、裁减和无效数据剔除, 将坐标转入 AutoCAD 中就生成了含有 553 104 个点的三维激光扫描影像图(图 1). 从三维激光扫描影像中采集了地物特征点 16 个, 并采用 2'' 级全站仪近距离设站, 在自由坐标系中实地测量 16 点的对应位置坐标, 且自由坐标系为与三维激光扫描坐标系一致的右手坐标系.

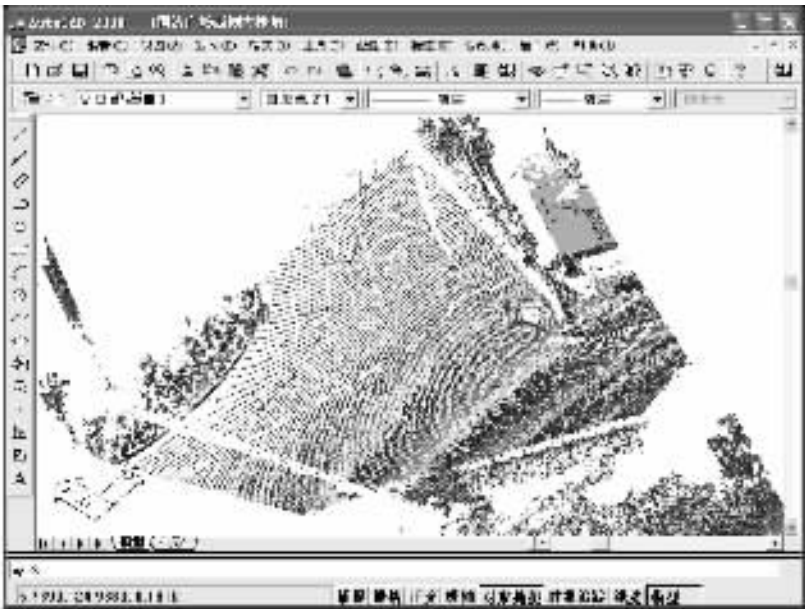


图 1 实验场地的三维激光扫描影像

Fig.1 Three-dimensional laser scanning image of test site

3.2 转换模型参数计算

按扫描影像数据拼接数学模型的解算方案推求了有尺度因子影响和无尺度因子影响的转换参数、单位权中误差(表1)及协因素阵.

表1 2种参数模型计算结果
Table 1 Results of two different combination models

参数模型	单位权中 误差 σ /mm	尺度因子 μ	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}
有尺度因子 参数模型	16.072	1.000 889 138 405 05	-0.162 418 016 852 81	0.986 712 159 665 894	0.004 211 013 904 51	-0.977 797 592 344 61
无尺度因子 参数模型	16.453	1.000 000 000 000 00	-0.162 426 190 524 38	0.986 715 089 029 89	0.004 211 182 199 87	-0.977 800 518 728 49

参数模型	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
有尺度因子 参数模型	-0.160 375 241 991 09	-0.134 886 233 518 56	-0.132 420 611 053 50	-0.026 025 856 115 30	0.990 851 992 435 17
无尺度因子 参数模型	-0.160 372 858 159 53	-0.134 884 892 640 21	-0.132 421 152 734 24	-0.026 025 490 490 56	0.990 851 903 901 98

注:由于合并模型在重心坐标系中进行了转换,计算得到的3个平移参数值均为零,故在表1中未列出.

从表1可见,当扫描平均距离为31 m时,扫描测距精度为3 mm,有尺度因子影响与无尺度因子影响的合并参数模型的差异不明显,转换模型的单位权中误差都近似为16 mm,略高于笔者试验所设置的三维激光扫描脚点18 mm的间距.合并模型的精度主要受到由激光测距、扫描角、二类高程等因素引起的三维激光脚点综合测量误差^[8],人工寻找三维扫描特征点误差和2″全站仪测定地物特征点误差以及激光脚点扫描间隔的影响.计算结果表明,试验中合并模型的单位权中误差主要受激光扫描间隔的影响,其他3项误差对合并模型的影响较小.

考虑尺度因子的合并模型与不考虑尺度因子的合并模型协因素阵的计算结果差异很小,表明是否考虑尺度因子对合并模型的方向余弦协因素阵的影响不明显.由于试验中合并模型的精度受激光测距的影响较小,尺度因子对模型计算结果的影响不大.另外,在考虑尺度因子的模型计算结果中,尺度因子值接近于9/10 000,较实际尺度因子偏大,主要是因为该尺度因子值中包含了一部分激光扫描间隔的贡献.试验数据中采用不考虑尺度因子的合并模型进行计算将更为可靠合理.

3.3 3个转换角及其精度

据表1方向余弦数据计算了合并模型的3个旋转角.据方向余弦协因素阵数据和式(12)计算了3个旋转角协因素阵和方差阵,并得到了旋转角的中误差,结果见表2.

表2 2种参数模型中3个旋转角及其中误差

Table 2 Three rotation angles of the two different combination models and their errors

参数模型		旋转角 $A(^{\circ})$	旋转角 $B(^{\circ})$	旋转角 $C(^{\circ})$	旋转角 A 中 误差/(″)	旋转角 B 中 误差/(″)	旋转角 C 中 误差/(″)
考虑尺度因子 参数模型	结果1	352.247 889 466 519	0.241 274 037 274	99.347 872 991 588	490.7	247.2	105.4
	结果2	172.247 889 466 519	179.758 725 962 726	279.347 872 991 588	490.7	247.2	105.4
无尺度因子 参数模型	结果1	352.247 966 996 942	0.241 283 679 973	99.346 640 737 087	502.7	253.3	108.0
	结果2	172.247 966 996 942	179.758 716 320 027	279.346 640 737 087	502.7	253.3	108.0

从表2可见,考虑与不考虑尺度因子的2种转换模型的3个旋转角差异不大.2种模型的旋转角中误差表明,本文试验合并模型中旋转角 A 的误差最大、 C 的误差最小.从旋转角精度来看,考虑尺度因子的模型的计算结果略好一些.

4 结论与建议

a. 在土木工程三维激光扫描影像拼接中,先运用附有限制条件的间接平差数学模型解算拼接模型中的13个参数再进一步解算7参数或6参数拼接模型的3个旋转角的方法,是正确有效的.

b. 激光扫描影像拼接的质量主要受激光脚点综合测量误差、人工寻找三维扫描特征点误差和激光脚点扫描间隔的影响.从试验结果来看,激光扫描脚点间隔过大将成为三维激光扫描合并的主要误差源.

c. 合并模型应用于土木工程时 ,宜根据三维激光扫描仪性能指标和实际使用所设置的工作环境对计算出的尺度因子值进行分析判断 ,并以此决定应用模型中是否需要考虑尺度因子的影响.

d. 本文提出的旋转角及其精度计算公式可以直观地评价同一激光扫描影像的拼接质量. 当采用多组同名点数据来确定几个合并模型时 ,可通过计算的旋转角精度进行比较分析 ,以选出较为合理的成果.

参考文献：

[1] SEOKBAE S ,HYUNPUNG P ,KWAN H L. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture ,2002 ,42 :889—897.

[2] SOON-YONG P ,MURALI S. An accurate and fast point-to-plane registration Technique[J]. Pattern recognition Letters ,2003 ,24 :2967—2976.

[3] THOMAS M. A new method for parametric surface registration[D]. Atlanta :Georgia Institute of Technology ,2000.

[4] 刘大杰 ,施一民 ,过静琚. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海 :同济大学出版社 ,1996.183—189.

[5] 方保 . 矩阵论[M]. 南京 :河海大学出版社 ,1993.72—85.

[6] 於宗伟 ,于正林. 测量平差原理[M]. 武汉 :武汉测绘科技大学出版社 ,1990.83—91.

[7] 郑德华 ,雷伟刚. 地面三维激光影像扫描测量技术[J]. 铁路航测 ,2003 ,29(2) :26—28.

[8] 张小红. 机载激光扫描测高数据滤波及地物提取[D]. 武汉 :武汉大学 ,2002.

Three-dimensional laser scanning image combination model
and experimental analysis

ZHENG De-hua

(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract:With the test data collected by the three-dimensional laser image scanner and total station , the three-dimensional laser scanning image combination model was figured out by the indirect adjustment model with constraint condition. Meanwhile , the rationality of the combination model was discussed with the scale factor taken into account. The result shows that the method for solution of the combination model is reasonable and valid , and that the laser scanning granularity of 18mm is of great influences on the precision of the combination model.

Key words :three-dimensional laser scanning image ; combination model ; constraint condition ; indirect adjustment model ; precision of rotation angle ; scale factor