

文章编号 1004-924X(2013)07-1840-10

基于多视影像匹配的三维彩色点云自动生成

张 卡^{1*}, 盛业华¹, 孟微波², 徐 鹏¹

- (1. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;
2. 江苏兰德数码科技有限公司, 江苏 南京 210002)

摘要:针对三维虚拟场景构建的需要,提出了一种基于多视影像匹配的航空影像三维彩色点云自动生成算法。该算法采用了一种全新的物方与像方信息融合的多视影像概率松弛整体匹配策略,以综合利用多幅影像信息来提高匹配的可靠度;然后,基于多视影像匹配结果,采用多影像光束法平差来计算待匹配点的三维坐标;最后,采用平差模型正确性的统计检验对三维坐标计算的准确度进行定量衡量。利用该算法对实际航空影像进行实验,统计检验得到的可靠度超过了90%,表明所提出的三维彩色点云生成方法具有较高的稳定性和精度。基于所提出的方法可将多视影像重叠区域内的所有平面像素转换为三维点,从而自动生成表达地理场景的全数字化的三维彩色点云,能很好地满足大范围三维地理场景快速重建的需要。

关键词:多视影像匹配;概率松弛;光束法平差;统计检验;三维彩色点云

中图分类号:P231;TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1840

Automatic generation of three dimensional colored point clouds based on multi-view image matching

ZHANG Ka^{1*}, SHENG Ye-hua¹, MENG Wei-bo², XU Peng¹

- (1. *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of the Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;*
 2. *Jiangsu Digitalland Technology Corporation, Ltd., Co., Nangjing 210002, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: zhangka81@126.com*

Abstract: With the aim to reconstruct three dimensional virtual scenes, a new algorithm for automatically generating three dimensional colored point clouds from aerial images is proposed in this paper. The algorithm adopts a new multi-view image probability relaxation global matching strategy based on fusion of object space and image space information to synthetically utilize multi-image information to improve matching reliability. Then, according to multi-view image matching results, multi-image bundle adjustment is used to compute the three dimensional coordinates of matching points. Finally, a statistical test on correctness of adjustment model is adopted to quantitatively measure the accuracy of computed three dimensional coordinates. The proposed algorithm is applied to actual aerial images. The experimental results on a statistical test indicate that matching reliability is above 90%, which

收稿日期:2012-12-18;**修订日期:**2013-01-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40901200, No. 41171321, No. 41101377);国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAH35B02);江苏高校优势学科项目;江苏省测绘科研项目(JSCHKY201011)

means that the proposed algorithm has higher robustness and precision. Through proposed method, all planar pixels in the overlapping region of multi-view image are transformed to three dimensional points, and three dimensional colored point clouds with full digital format is automatically generated to represent geographic scenes. It can well satisfy the requirements of quick reconstruction of three dimensional geographic scenes with large scopes.

Key words: multi-view image matching; probability relaxation; bundle adjustment; statistical test; three dimensional colored point cloud

1 引言

地理场景的三维可视化是3D GIS发展的关键技术,也是空间信息服务环境具备体验性的基础,已经和大众化、开放性、可量测、可挖掘一并成为空间信息服务的基本要求^[1]。由于激光扫描技术能直接获得地物表面的密集三维点云数据,已被广泛应用于地理场景的三维重建^[2-5]。基于激光扫描点云的三维重建先利用激光扫描仪获取目标的三维点云数据,然后对点云数据进行特征提取、表面网格构建等处理来重建目标的三维表面模型。但是,该类方法也存在以下缺点:激光扫描设备昂贵、三维点云的自动化处理程度不高、手工操作工作量较大等。另外,在激光扫描时,几何数据和纹理数据分开采集,若想得到逼真的三维模型或彩色点云,则需要配置额外的影像传感器并进行纹理映射^[6-8],这必然增加数据采集的成本和数据处理的复杂度。

由于激光扫描技术需要影像的辅助才能获得具有纹理色彩的三维模型,因此,如果能只使用影像就完成三维彩色点云的生成工作,则可以有效地降低数据采集和数据处理的成本。基于影像的三维建模^[9-14]的基本技术流程为:先利用自动/半自动/人机交互的方法从影像中获取目标的三维空间信息,然后进行目标的三维模型构建,最后进行纹理映射、光照、消隐等一系列制作以产生最终的虚拟目标(或场景)。从影像自动提取三维信息的过程中,影像匹配是一个关键技术^[15-18]。但是,立体影像匹配方法在影像纹理重叠、遮挡等区域存在匹配可靠度不高的问题。为了克服这些缺点,多视影像匹配方法的研究得到了重视^[19-21]。现有的多影像匹配方法在搜索候选同名点时主要采用如下两种策略:基于物方高程信息的物方搜

索和基于像方信息的像方搜索。物方搜索策略首先确定地物点的最大和最小高程范围 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$,再从最小高程值出发,每次增加 $i \times \Delta Z (i = 1, 2, 3, \dots, n)$,在地物空间确定待搜索点的物方 Z 值: $Z = Z_{\min} + i \times \Delta Z$,再将地物空间点投影到各搜索影像上得到像方的搜索点,进而完成相似度的计算和匹配过程的传播。但是 ΔZ 在取值时,无法保证搜索点一定经过待匹配点对应的地物点。 ΔZ 过大,则肯定漏掉正确的候选点; ΔZ 过小,又要花费更多的计算和搜索时间。像方搜索策略是先根据地物点的最大和最小高程范围在各搜索影像上确定像方的搜索范围,然后以像方的搜索范围为基础,各搜索影像与基准影像分别完成立体匹配。该策略在各搜索影像上获得的搜索范围并不相同,无法同时利用多幅影像信息来计算匹配测度。

因此,本文在借鉴现有多影像匹配方法的基础上,提出了一种全新的物方和像方信息融合的多视影像概率松弛整体匹配策略,并基于此完成多幅影像的逐像素密集匹配;再结合多像光束平差法计算匹配点的三维坐标,最后将平面像素转换为三维的彩色点。对实际航空影像的实验结果表明,文中方法能有效地从二维影像自动生成为三维彩色点云,实现对地理场景的真三维数字化表达和再现,并省去了传统基于影像三维建模方法中的先几何建模再纹理映射的复杂处理过程。

2 本文方法的原理

如果能将二维影像的平面像素转换成三维空间的点,则可将二维影像转换成真三维彩色点云。由立体摄影测量原理可知,利用立体像对中的同名像点在左、右影像上的像平面坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,可以解算出像点所对应地物点的三维

空间坐标 (X, Y, Z) , 再结合其在左(或右)影像上 R, G, B 3 个通道的灰度值, 则一个平面像素就转换成了具有三维坐标和颜色信息的彩色点。

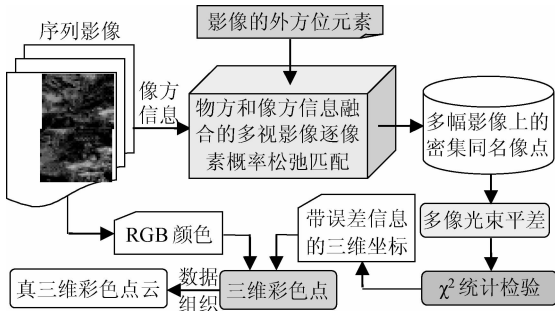


图 1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed approach

因此, 本文的三维彩色点云自动生成方法的流程图如图 1 所示, 其基本过程为: (1) 获取测区具有外方位元素的序列影像; (2) 根据影像外方位元素提供的物方信息, 对序列影像重叠区域内的所有像素进行基于物方和像方信息融合的多视影像逐像素概率松弛整体匹配; (3) 根据匹配的同名点结果, 利用多影像光束法平差计算所匹配像素的三维空间坐标, 从而将重叠区域内的每个平面像素都转换成三维彩色点; 并采用平差模型正确性的 χ^2 统计检验法对光束平差计算结果的可靠度进行定量度量; 最后, 将这些彩色点按如下的数据结构进行组织就构成了测区地理场景的三维彩色点云。

Struct 3D Color Point//三维彩色点的数据结构

```
{
    Int ID;//点序列号
    Double X, Y, Z;//三维空间坐标
    Int R, G, B;//点在 RGB 颜色空间中的 R、G、B 灰度值
    Double  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ;//三维坐标计算时的单位权中误差, 及 3 个坐标分量的中误差
}
```

Struct 3D Virtual Scene//三维彩色点云组成的虚拟场景的数据结构

```
{
    3D Color Point P3D;//3D Color Point 变量
}
```

2.1 物方和像方信息融合的多视影像匹配

以相邻的 3 幅影像来阐述本文的多视影像匹配过程, 如图 2 所示, 假设有相邻的 3 幅影像: 左像 I_L 、中像 I_M 、右像 I_R (可构成相邻的 2 个立体像对 $I_L - I_M, I_M - I_R$), 其对应的摄影中心分别为 S_L, S_M, S_R ; 各自的外方位元素分别为 $(X_L, Y_L, Z_L, \varphi_L, \omega_L, \kappa_L), (X_M, Y_M, Z_M, \varphi_M, \omega_M, \kappa_M), (X_R, Y_R, Z_R, \varphi_R, \omega_R, \kappa_R)$ 。以中像 I_M 为基准影像, 对于基准影像上的一个待匹配点 p , 确定其在左、右搜索影像 I_L, I_R 上的同名像点的多视影像匹配主要分以下几个步骤: 利用外方位元素提供的物方信息、以及影像本身的像方信息, 在多幅搜索影像上确定同名像点的搜索范围。利用 SIFT 特征^[15-16]和颜色特征来计算待匹配点和搜索范围内每一个候选像点之间的多像综合匹配相似度, 并基于概率松弛整体匹配策略确定最终的同名像点。至于更多影像的匹配可依据 3 幅影像匹配策略来类推, 即先在基准影像上确定待匹配点的物方搜索范围, 再分别投影到各个搜索影像确定像方搜索范围, 最后基于概率松弛法确定同名像点。

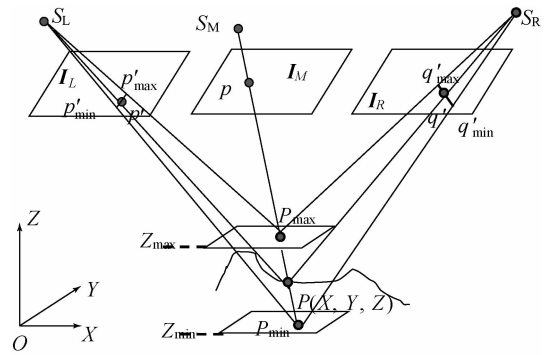


图 2 确定待匹配点的同名点搜索范围示意图

Fig. 2 Sketch for confirming searching scopes of homonymy points of matching point

2.1.1 物、像方信息融合的候选同名像点搜索

(1) 确定待匹配点对应地物点在物方的高程范围。 p 点对应的地物点 P 一定位于摄影光线 $S_M P$ 上, 且 P 点的高程 Z 一定位于该地区最低高程 Z_{min} 和最大高程 Z_{max} 之间; 用高程分别为 Z_{min} 和 Z_{max} 的 2 个水平面 H_{min}, H_{max} 与摄影光线 $S_M P$ 相交, 可得 2 个虚拟地物点 P_{min}, P_{max} , 则 P 点一定位于线段 $P_{min} P_{max}$ 上; 点 P_{min}, P_{max} 对应的平面坐标 $(X_{min}, Y_{min}), (X_{max}, Y_{max})$ 可将 Z_{min} 和 Z_{max} 带入下式计算:

$$\begin{cases} X = X_M + (Z - Z_M) \frac{a_1^M x + a_2^M y - a_3^M f}{c_1^M x + c_2^M y - c_3^M f} \\ Y = Y_M + (Z - Z_M) \frac{b_1^M x + b_2^M y - b_3^M f}{c_1^M x + c_2^M y - c_3^M f} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:\$(x, y)\$是待匹配点 \$p\$ 在影像 \$I_M\$ 的像平面坐标系中的坐标, \$f\$ 是已知的像片主距, \$a_i^M, b_i^M, c_i^M\$ (\$i=1, 2, 3\$) 是由影像 \$I_M\$ 的外方位角元素 (\$\varphi_M, \omega_M, \kappa_M\$) 确定的旋转矩阵中的 9 个方向余弦。

(2) 根据物方高程范围确定待匹配点的候选同名像点在像方的搜索范围。根据左像 \$I_L\$、右像

$$\begin{cases} x'_{\min} = -f \frac{a_1^R (X_{\min} - X_R) + b_1^R (Y_{\min} - Y_R) + c_1^R (Z_{\min} - X_R)}{a_3^R (X_{\min} - X_R) + b_3^R (Y_{\min} - Y_R) + c_3^R (Z_{\min} - X_R)} \\ y'_{\min} = -f \frac{a_2^R (X_{\min} - X_R) + b_2^R (Y_{\min} - Y_R) + c_2^R (Z_{\min} - X_R)}{a_3^R (X_{\min} - X_R) + b_3^R (Y_{\min} - Y_R) + c_3^R (Z_{\min} - X_R)} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} y' = k^R x' + d^R \\ k^R = \frac{y'_{\max} - y'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}}, d^R = y'_{\max} - k^R x'_{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: \$a_i^R, b_i^R, c_i^R\$ (\$i=1, 2, 3\$) 是由右像 \$I_R\$ 的外方位角元素 (\$\varphi_R, \omega_R, \kappa_R\$) 确定的旋转矩阵中的 9 个方向余弦, \$k^R, d^R\$ 为右搜索影像上搜索范围直线的斜率和截距。

(3) 多像物方和像方信息融合的匹配搜索过程。对于左搜索影像 \$I_L\$ 搜索范围 \$p'_{\min} p'_{\max}\$ 上的任何一个候选同名像点 \$p'_i\$, 先根据 \$p\$ 和 \$p'_i\$ 在各自影像上的行列坐标, 及 \$I_M, I_L\$ 的外方位元素, 利用双像前方交会方法计算该候选像点对应地物点的三维坐标 \$(X_i, Y_i, Z_i)\$。其次, 根据 \$I_R\$ 的外方位元素, 利用式(2)计算三维坐标 \$(X_i, Y_i, Z_i)\$ 反投影到 \$I_R\$ 上的像平面坐标 \$x'_i\$, 再利用式(3)计算对应的像平面坐标 \$y'_i\$, 从而得到与左搜索影像候选点 \$p'_i\$ 对应的右搜索影像候选点 \$q'_i\$。再次, 对于待匹配点 \$p\$ 和 \$I_L, I_R\$ 的候选点 \$p'_i, q'_i\$, 利用式(4)分别计算 \$p\$ 和 \$p'_i, p\$ 和 \$q'_i\$ 的综合匹配相似度 \$\rho^{L_i}, \rho^{R_i}\$, 并取这 2 个匹配度的平均值作为第 \$i\$ 个候选点的多像匹配相似度 \$\rho_i = (\rho^{L_i} + \rho^{R_i})/2\$, 从而达到同时利用多幅影像信息提高匹配相似度可靠性的目的^[15]。如果多像匹配相似度大于给定的阈值(本文取 0.1), 则视点 \$p'_i, q'_i\$ 为左、右搜索影像上的候选同名像点。

\$I_R\$ 的外方位元素, 将虚拟地物点 \$P_{\min}(X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}), P_{\max}(X_{\max}, Y_{\max}, Z_{\max})\$ 分别往 \$I_L\$ 和 \$I_R\$ 上进行反投影, 在 \$I_L\$ 上得到对应的像点 \$p'_{\min}, p'_{\max}\$, 在 \$I_R\$ 上得到对应的像点 \$q'_{\min}, q'_{\max}\$, 反投影像点对应的像平面坐标 \$(x', y')\$ 按式(2)计算(以 \$P_{\min}\$ 往 \$I_R\$ 上投影为例)。则待匹配点 \$p\$ 在影像 \$I_L, I_R\$ 上的同名像点 \$p', q'\$ 一定位于线段 \$p'_{\min} p'_{\max}\$ 和 \$q'_{\min} q'_{\max}\$ 上(这 2 个线段实际上就是利用外方位元素确定的同名核线), 候选点搜索范围的直线方程如式(3)所示(同样以 \$I_R\$ 上反投影的线段为例)。

$$\begin{cases} \rho = (\rho_c + \rho_s)/2 \\ \rho_c = (\rho_g^r + \rho_g^s + \rho_g^b)/3, \rho_s = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}' / (|\mathbf{S}| |\mathbf{S}'|) \\ \rho_g^r = \frac{m_{RR'} - m_R m_{R'}}{\sqrt{(m_R^2 - (m_R)^2/16^2)(m_{R'}^2 - (m_{R'})^2/16^2)}} \\ m_R = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} R_{ij}, m_R^2 = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} R_{ij}^2 \\ m_{R'} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} R'_{ij}, m_{R'}^2 = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} R'^2_{ij} \\ m_{RR'} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} R_{ij} R'_{ij} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: \$\mathbf{S}, \mathbf{S}'\$ 分别为待匹配点和搜索点的 SIFT 特征向量, \$\rho_g^r, \rho_g^s, \rho_g^b\$ 分别为目标窗口影像在红、绿、蓝 3 个灰度通道内的灰度函数 \$R(x, y), G(x, y), B(x, y)\$ 和搜索窗口影像 \$R'(x, y), G'(x, y), B'(x, y)\$ 的灰度相关系数。

2.1.2 多像概率松弛整体影像匹配

概率松弛整体影像匹配考虑了邻域点之间的一致性, 真正的同名点会得到最大的邻域支持。在松弛迭代匹配过程中, 真正候选点的匹配概率不断增加, 而虚假候选点的概率不断减少, 当迭代收敛时就能得到真正的匹配同名点。对于基准影像上

的待匹配点 p_i (其行、列号为 h_i, l_i), 利用 2.1.1 节的方法确定其在搜索影像上的 m 个候选同名点 (左搜索影像上的点记为 p'_j , 其行、列号为 h_j^L, l_j^L ; 右搜索影像记为 q'_j , 其行、列号为 h_j^R, l_j^R), 对应的多像匹配相似度为 $\rho_j (j=1, 2, \dots, m)$, 则每个候选点的匹配概率 $P(i, j)$ 为:

$$P(i, j) = \rho_j / \sum_{j=1}^m \rho_j. \quad (5)$$

确定了待匹配点的候选同名点后, 利用其 8 邻域点进行概率松弛迭代匹配。设 p_k 是 p_i 的一个 8 邻域点 (其行、列号为 h_k, l_k), 同样利用 2.1.1 节的方法确定该邻域点在左、右搜索影像上的 n 个候选同名点 p'_t, q'_t (其行、列号分别为 $h_t^L, l_t^L, h_t^R, l_t^R$), 及其匹配相似度 $\rho_t (t=1, 2, \dots, n)$, 则可定义如下的相容系数来表达待匹配点的候选匹配与邻域点的候选匹配之间的相容性:

$$C(i, j; k, t) = \left(\frac{e^{-(\Delta_x^L \times \Delta_x^L + \Delta_y^L \times \Delta_y^L) / w}}{1 + D(i, j)} + \frac{e^{-(\Delta_x^R \times \Delta_x^R + \Delta_y^R \times \Delta_y^R) / w}}{1 + D(i, j)} \right) / 2, \quad (6)$$

式中: $\Delta_x^L = (l_j^L - l_i^L) - (l_i - l_k), \Delta_y^L = (h_j^L - h_i^L) - (h_i - h_k), \Delta_x^R = (l_j^R - l_i^R) - (l_i - l_k), \Delta_y^R = (h_j^R - h_i^R) - (h_i - h_k)$, 分别为待匹配点与其邻域点在左、右搜索影像上的列视差之差与行视差之差, 此值越大, 相容系数越小; $D(i, j)$ 为待匹配点与其邻域点之间的像平面欧式距离 (以像素为单位), 此值越大, 相容系数越小; w 为匹配窗口的大小。

计算出相容系数后, 再按式 (5) 计算邻域点的候选匹配点的匹配概率 $P(k, t)$, 并按下式计算 8 邻域点 ($\Omega(p_i)$ 表示点 p_i 的 8 邻域) 对待匹配点的匹配支持度:

$$S(i, j; k, t) = \sum_{k \in \Omega(p_i)} \sum_{t=1}^n P(k, t) C(i, j; k, t). \quad (7)$$

获得待匹配点的 8 邻域点对待匹配点的候选同名点的支持度后, 按下式迭代计算每个候选点的匹配概率:

$$P^{(r+1)}(i, j) = \frac{P^{(r)}(i, j) \times (P^{(r)}(i, j)(c_0 + c_1)S(i, j; k, t))}{\sum_{j=1}^m (P^{(r)}(i, j) \times (P^{(r)}(i, j)(c_0 + c_1)S(i, j; k, t)))}, \quad (8)$$

式中: r 为迭代次数 (本文取 10), c_0, c_1 为松弛系数 (本文都取 1)。当待匹配点存在一个匹配概率大于 0.9 的候选同名点或达到设定的迭代次数时, 迭

代过程停止。此时, 选取匹配概率最大的 2 个点 p', q' 作为待匹配点在左、右搜索影像上的真正的同名像点。

2.2 基于多像光束平差法的三维坐标计算

经多像匹配后, 可得到基准影像 I_M 上的待匹配点 p , 左右搜索影像 I_L, I_R 上的同名像点 p', q' , 对于每幅影像上的像点, 在影像内外方位元素已知的情况下, 视像点的像平面坐标为观测值, 可列出如下的像平面坐标 (x, y) 与对应物方三维坐标 (X, Y, Z) 之间的误差方程 (以基准影像为例):

$$\begin{cases} v_x = -a_{11}^M \hat{x} - a_{12}^M \hat{y} - a_{13}^M \hat{z} - (x - x_M^0) \\ v_y = -a_{21}^M \hat{x} - a_{22}^M \hat{y} - a_{23}^M \hat{z} - (y - y_M^0) \end{cases}, \quad (9)$$

式中,

$$\begin{cases} a_{11}^M = (a_1^M f + a_3^M x) / \bar{Z}, a_{12}^M = (b_1^M f + b_3^M x) / \bar{Z} \\ a_{13}^M = (c_1^M f + c_3^M x) / \bar{Z}, a_{21}^M = (a_2^M f + a_3^M x) / \bar{Z} \\ a_{22}^M = (b_2^M f + b_3^M x) / \bar{Z}, a_{23}^M = (c_2^M f + c_3^M x) / \bar{Z} \\ \bar{Z} = a_3^M (X^0 - X_M) + b_3^M (Y^0 - Y_M) + c_3^M (Z^0 - Z_M) \end{cases},$$

其中, (X^0, Y^0, Z^0) 是地物点待求坐标 (X, Y, Z) 的近似值 (可根据 p 和 p' 点, 利用双像前方交会计算得到), $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 是近似三维坐标的平差改正数, (x_M^0, y_M^0) 是将近似三维坐标带入式 (2) 计算的点 p 在 I_M 上的近似像平面坐标。

因此, 对于相邻的三幅影像上的 3 个同名像点 $p(x, y), p'(x'_L, y'_L), q'(x'_R, y'_R)$, 可以按式 (9) 列出 6 个误差方程, 则多像光束法平差的矩阵形式的误差方程如式 (10) 所示:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{L}, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{V} = [v_x^L \quad v_y^L \quad v_x^M \quad v_y^M \quad v_x^R \quad v_y^R]^T, \mathbf{X} = [\hat{x} \quad \hat{y} \quad \hat{z}]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_{11}^L & -a_{12}^L & -a_{13}^L \\ -a_{21}^L & -a_{22}^L & -a_{23}^L \\ -a_{11}^M & -a_{12}^M & -a_{13}^M \\ -a_{21}^M & -a_{22}^M & -a_{23}^M \\ -a_{11}^R & -a_{12}^R & -a_{13}^R \\ -a_{21}^R & -a_{22}^R & -a_{23}^R \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} x'_L - x_L^0 \\ y'_L - y_L^0 \\ x - x_M^0 \\ y - y_M^0 \\ x'_R - x_R^0 \\ y'_R - y_R^0 \end{bmatrix}$$

根据最小二乘间接平差原理, 近似坐标改正数向量的解为: $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{L})$ 。进而可求出待匹配点对应地物点的三维坐标:

$$X = X^0 + \hat{x}, Y = Y^0 + \hat{y}, Z = Z^0 + \hat{z}$$

利用光束平差法不但能求出待匹配点的三维

坐标,还可按下式求出坐标解算时的单位权中误差 $\hat{\sigma}_0$,以及 3 个坐标分量的中误差 σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 。

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_0 = \sqrt{(\mathbf{V}^T \mathbf{V})/3} \\ \mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \\ \sigma_X = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{11}}, \sigma_Y = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{22}}, \sigma_Z = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{33}} \end{cases}, \quad (11)$$

经过以上的过程,可以得到待匹配点在多幅搜索影像上的同名像点,并计算出其对应地物点的三维坐标。显然,多像匹配结果的准确性会影响到三维坐标计算的可靠性。由于三维坐标是通过多像光束平差法计算得到的,因此,本文采用平差模型正确性的 χ^2 统计检验法^[22],来对多像光束平差结果进行检验,以衡量三维坐标计算的可靠度。检验的基本过程是:对某个待匹配点的平差结果,根据平差计算的后验方差估值 $\hat{\sigma}_0^2$ 和事先确定的先验方差 σ_0^2 ,按式(12)计算其检验统计量,若值大于以显著水平 α (本文选 $\alpha=0.01$)和自由度 f (n 幅影像匹配时, $f=2n-3$)查得的 χ_α^2 值,则认为平差计算的三维坐标结果不可靠;否则认为所计算的三维坐标可靠,

$$\chi_{(f)}^2 = f \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}. \quad (12)$$

3 实验结果

为了验证本文算法的实际效果,在 Windows XP 环境下,采用 Visual C#.NET2010 程序设计语言对算法进行了编程实现,并用江苏某地拍摄的一条航线的 11 幅 DMC 彩色数码航空影像进行了实验。影像的大小为 7 680 pixel×13 824 pixel,像元尺寸为 12 μm ,相机焦距为 120 mm,航拍高度为 700 m,航向重叠度为 65%(由于重叠度不是很大,航线方向上的影像最多只能形成 3 度重叠区域),影像内外方位元素均已知。图 3(a)、3(b)显示了其中的 2 个区域的 6 幅影像,图 3(c)是根据本文方法对 3(a)、3(b)中的每 3 幅影像进行多像匹配生成的彩色点云(其中,最左侧一栏是局部影像区域,中间两栏是从不同角度浏览该区域影像对应的三维彩色点云的效果图,最右边一栏是放大后的效果)。

为了衡量本文方法的可靠性,还将本文方法与文献[21]的方法(只使用其匹配搜索策略)进行了

三维点云生成的效果对比,并采用 2.2 节的可靠度检验方法对所生成的三维点云进行可靠度统计。在相同的检验条件下:显著水平 $\alpha=0.01$ 、先验中误差 $\sigma_0=0.012$ mm,本文方法所得到可靠点的比率为 93.6%,文献[21]方法的可靠点比率为 66.2%(此值和文献[21]中的匹配成功率 79.2%有些不一致,主要原因如下:本文的可靠点是指通过统计假设检验的点;而文献[21]的匹配成功率是指经多像匹配和多光线前方交会后的单位权中误差小于给定阈值的匹配结果点,和本文的可靠点的统计标准不同)。图 4(文章彩图见期刊电子版)显示了 2 种方法所生成三维点云(局部区域)的效果对比情况,其中 4(a)为局部影像,4(b)、4(c)分别为文献[21]方法和本文方法所生成对应区域的三维点云(其中的红色点为统计检验确定的不可靠点)。

另外,为了检验本文方法所生成三维点云的精度,从实验影像中选择了 12 个已知像方和物方坐标的点作为检验点,利用本文方法来对这些点进行多像匹配和三维坐标计算,并将计算的三维坐标与已知坐标进行比较,以得到 3 个坐标分量的差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ;而且,还根据式(11)计算了各个检验点的坐标分量中误差 σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z ,具体的精度检验结果列于表 1。

表 1 本文方法的精度检验结果

Tab. 1 Precision test results of proposed approach for control points (mm)

点名	ΔX	ΔY	ΔZ	σ_X	σ_Y	σ_Z
33054137	7	14.7	171.5	7.7	7.7	34.8
33054038	0.7	2.1	45	6.7	15.5	29.6
32054013	10.9	-0.2	0.1	10.1	17.5	43.2
3305408	-3.4	-100.5	145.2	4.7	15.0	20.9
3305401	-4.5	15.5	-8.6	13.8	37.5	61.1
3406108	-12.2	-1.3	-0.9	10.3	19.1	46.0
980547	-7.3	-18.9	12.4	9.4	21.0	42.0
33060134	7.7	-0.5	132.4	16.1	16.1	73.3
3206002	14.4	-61.6	220.8	2.0	3.3	9.1
3306008	-49.9	272.7	-425.3	7.9	23.4	34.6
330602	-3.6	0.1	-0.4	10.3	26.7	46.6
3406708	-7.2	29.7	13.3	9.1	20.4	41.4
绝对平均值	10.7	43.2	97.9	9.0	18.6	40.2

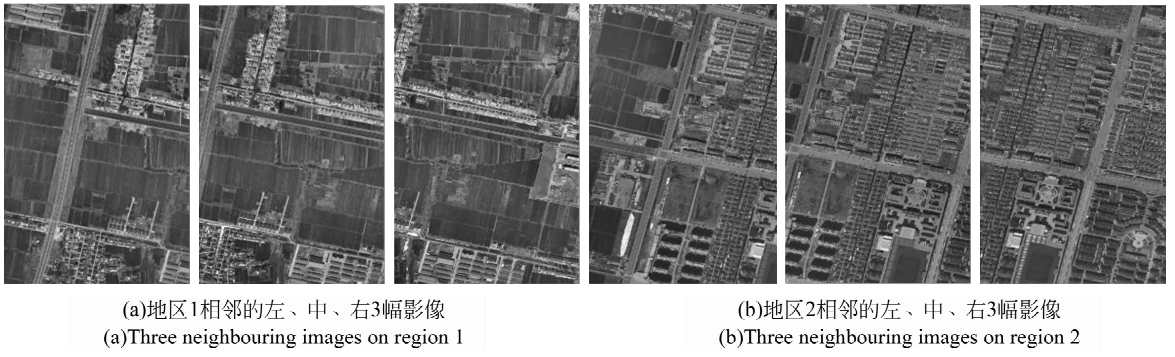


图 3 实验航空影像与本文方法生成的三维彩色点云

Fig. 3 Experimental aerial images and 3D colored point clouds generated by proposed approach

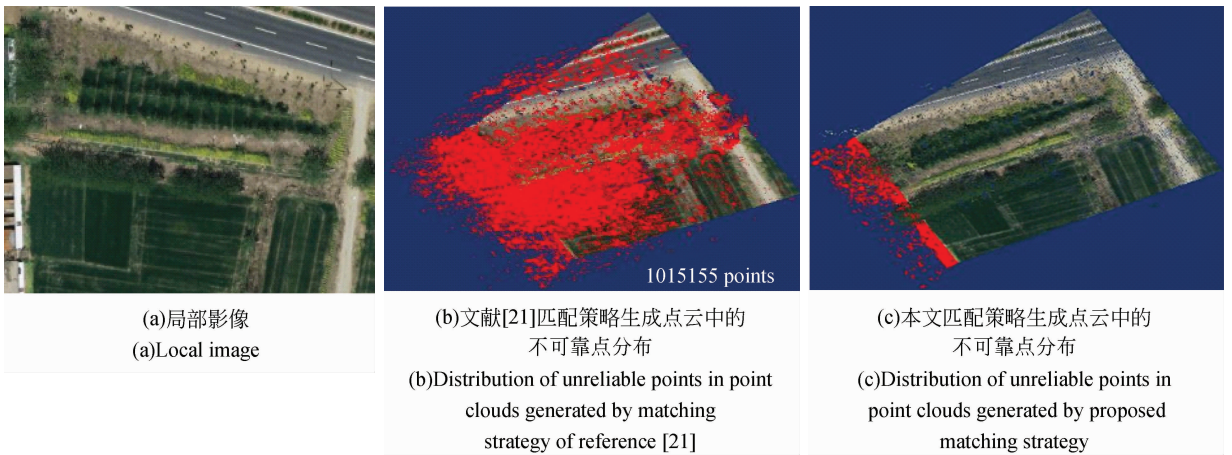


图 4 不同影像匹配方法生成的三维点云中不可靠点分布的对比结果

Fig. 4 Results of unreliable point distribution in 3D point clouds generated by different image matching methods

从实验结果可以看出,本文方法取得了较高的匹配可靠度和坐标解算精度。所生成的三维彩色点云既具有三维坐标信息,又具有颜色纹理信息,而且,在生成三维点云的过程中,除了在方法开始阶段需设置必要的影像匹配参数外,余下的过程都是自动执行,无需人机交互。因此,文中方法可以很好地用来对地理场景进行三维重建,特别适合于基于航空影像的大范围虚拟地理场景快速自动重建。当然,为了取得较好的虚拟场景生成效果,参与运算的多幅影像至少应是三度重叠的(重叠度越大,能参与多视影像匹配的可用影像就越多,但这也相应增加算法的运行时间)。另外,由于影像中存在遮挡、视差断裂等匹配困难区域,本文方法也存在一定的误匹配点,从而导致所生成的三维点云中存在几何位置错误的点、以及没有点的空洞区域,这需要在后续的研究中进一步改进。

5 结 论

本文针对虚拟地理环境对客观、真实的地理场景进行真三维的数字化表达和再现的需要,提出了用基于多视影像匹配生成三维彩色点云来再现地理场景的方法。文中方法所生成的三维彩色点云能同时融合传统的三维模型的三维空间信息和二

维影像的颜色信息,可真实、一体化地刻画地理场景,而不必将三维信息和影像分开存储、使用,这样就能只基于影像来实现激光扫描仪与影像传感器相结合才能完成的彩色点云获取工作。而且,为了有效地将二维影像中的平面像素转换成三维像素,本文设计了一种融合像方和物方信息的多视影像概率松弛整体匹配方法,该方法可有效地利用多视影像信息来提高匹配的可靠度。用实际数码航空影像进行了大量的实验,实验结果表明,文中方法的匹配可靠度超过了90%,根据匹配结果计算的X、Y、Z 3个坐标分量的理论精度分别为9、18.6、40.2 mm,验证了本文方法的有效性。另外,文中的真三维彩色点云可以将现在的数字摄影测量系统中形成的虚拟人造视觉立体模型转换成可存储、可操作的真实三维数字模型,而且在该数字模型上还可以进一步进行空间数据(DLG、DEM等)的生产及地理空间分析,这为三维空间信息的按需采集提供了一种可以利用的数据基础。今后仍需在如下一些方面进行更深入的研究:进一步提高多视影像匹配的可靠性;彩色点云中错误点的准确判断与纠正;三维彩色点云的高效组织与索引方案,以实现大范围地理场景的真三维点云的高效浏览、交互操作;基于真三维彩色点云的地物目标的自动提取等。

参考文献:

- [1] 李德仁. 论地球空间信息的3维可视化:基于图形还是基于影像[J]. 测绘学报, 2010, 39(2): 111-114.
LI D R. 3D visualization of geospatial information: graphics based or imagery based [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(2): 111-114. (in Chinese)
- [2] NGUYEN T T, 刘修国, 王红平, 等. 基于激光扫描技术的三维模型重建[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 1-6.
NGUYEN T T, LIU X G, WANG H P, *et al.*. 3D model reconstruction based on laser scanning technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 1-6. (in Chinese)
- [3] 曾齐红, 毛建华, 李先华, 等. 机载 LiDAR 点云数据的建筑物重建研究[J]. 武汉大学学报(信息科学

版), 2011, 36(3): 321-324.

ZENG Q H, MAO J H, LI X H, *et al.*. Building reconstruction from airborne LiDAR points cloud data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 321-324. (in Chinese)

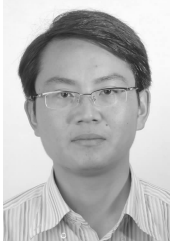
- [4] BARUCH A, FILIN S. Detection of gullies in roughly textured terrain using airborne laser scanning data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(5): 564-578.
- [5] WELIGEPOLAGE K, GIESKE A S M, SU Z. Surface roughness analysis of a conifer forest canopy with airborne and terrestrial laser scanning techniques [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 192-203.
- [6] 戴彬, 钟若飞, 胡竞. 基于车载激光扫描数据的城市地物三维重建研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 89-96.

- DAI B, ZHONG R F, HU J. Research on 3D reconstruction of urban features from data based on vehicle-borne laser scanning [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 32(3):89-96. (in Chinese)
- [7] 王晏民, 胡春梅. 一种地面激光雷达点云与纹理影像稳健配准方法[J]. *测绘学报*, 2012, 41(2): 266-272.
- WANG Y M, HU CH M. A robust registration method for terrestrial LiDAR point clouds and texture image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2):266-272. (in Chinese)
- [8] PESCI A, BONALI E, GALLI C, *et al.*. Laser scanning and digital imaging for the investigation of an ancient building: Palazzo d'Accursio study case (Bologna, Italy) [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2012, 13(2):215-220.
- [9] POLLEFEYS M, NISTÉR D, FRAHM J M, *et al.*. Detailed real-time urban 3D reconstruction from video [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 78(2-3):143-167.
- [10] 张峰, 许振辉, 史利民, 等. 基于宽基线图像远距离场景的自动三维重建[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(2):256-263.
- ZHANG F, XU ZH H, SHI L M, *et al.*. Automatic reconstruction of distant scenes from wide baseline images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(2):256-263. (in Chinese)
- [11] BARAZZETTI L, SCAIONI M, REMONDINO F. Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images-combining accuracy with automation [J]. *The Photogrammetric Record*, 2010, 25(132): 356-38.
- [12] WONG S S, CHAN K L. 3D object model reconstruction from image sequence based on photometric consistency in volume space [J]. *Pattern Analysis Applications*, 2010, 13(4):437-450.
- [13] LI L, BURNETT I S, CHENG E. A dense 3D reconstruction approach from uncalibrated video sequences [C]. *2012 IEEE Conference on Multimedia and Expo Workshops*, 2012:587-592.
- [14] SIMON L, TEBOUL O, KOUTSOURAKIS P, *et al.*. Parameter-free/pareto-driven procedural 3D reconstruction of buildings from ground-level sequences [C]. *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012:518-525.
- [15] 张卡, 盛业华, 叶春. 基于数字视差模型和改进 SIFT 特征的数字近景立体影像匹配[J]. *测绘学报*, 2010, 39(6):624-630.
- ZHANG K, SHENG Y H, YE CH. Digital close-range stereo image matching based on digital parallax model and improved SIFT feature [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(6):624-630. (in Chinese)
- [16] 丘文涛, 赵建, 刘杰. 结合区域分割的 SIFT 图像匹配方法[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(6):827-831.
- QIU W T, ZHAO J, LIU J. Image matching algorithm combining SIFT with region segmentation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6):827-831. (in Chinese)
- [17] 赵西安, 陈志学, 吕京国, 等. 具有尺度与旋转不变性的立体影像自动匹配研究[J]. *测绘学报*, 2012, 41(1):81-86.
- ZHAO X A, CHEN ZH X, LV J G, *et al.*. The scale and rotating invariant auto stereo matching [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(1):81-86. (in Chinese)
- [18] 周自维, 樊继壮, 李戈, 等. 支撑点扩展快速立体匹配方法的设计与应用[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1):207-216.
- ZHOU Z W, FAN J ZH, LI G, *et al.*. Design and application of fast matching method based on support point expansion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):207-216. (in Chinese)
- [19] ZHANG L, GRUEN A. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(3):195-211.
- [20] 纪松, 范大昭, 张永生, 等. 多视匹配 MVLL 算法及其在 ADS40 线阵影像中的运用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(1):28-31.
- JI S, FAN D ZH, ZHANG Y SH, *et al.*. MVLL multi-image matching model and its application in ADS40 linear array images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1):28-31. (in Chinese)
- [21] 袁修孝, 明洋. 一种综合利用像方和物方信息的多影像匹配方法[J]. *测绘学报*, 2009, 38(3):216-222.
- YUAN X X, MING Y. A novel method of multi-image matching using image and space synthesis information [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3):216-22. (in Chinese)
- [22] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与

测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
Surveying Adjustment Group of School of Surveying and Mapping in Wuhan University. Error

Theory and Foundation of Surveying Adjustment
 [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



张 卡(1981—),男,安徽五河人,博士,副教授,2002年、2005年于中国矿业大学分别获得学士、硕士学位,2008年于南京师范大学获得博士学位,主要从事数字摄影测量与图像信息提取等方面的研究。E-mail: zhangka81@126.com



孟微波(1963—),男,山东济阳人,学士,高级工程师,1983年于郑州解放军测绘学院获得学士学位,主要从事基于图像的3D数据采集、GIS数据处理及应用等方面的研究。E-mail: mwb@jsland.com



盛业华(1965—),男,安徽庐江人,博士,教授,博士生导师,1986年、1989年和1997年于中国矿业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事3D GIS数据模型、基于图像的3D数据采集、3D模型构建等方面的研究。E-mail: shengyehua@njnu.edu.cn



徐 鹏(1987—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,2010年于南京信息工程大学获得学士学位,主要从事海量三维点云数据组织与管理等方面的研究。E-mail: linmusq87@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)