

一种激光扫描数据与数码照片的配准方法

邓 非¹ 张祖勋² 张剑清²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:提出了一种激光扫描数据和数字图像配准的方法。该方法基于立体像对匹配点与三维扫描点云的最近邻迭代配准。配准中,采用 M -估计的选择权迭代在最邻近点搜索算法中逐步消除立体像对误匹配粗差点的影响,得到正确的收敛结果,并基于地面实验证明此方法是可行的和有效的。
关键词:配准;激光扫描;数字图像;最近邻迭代;稳健估计
中图法分类号:TP751; P234.1

激光扫描测量技术是最近发展起来的一种新技术,已成为空间数据获取的一种重要技术手段。实践中,在获取激光扫描数据的同时,可利用数码相机在被测物体周围补拍若干照片,若能将它们结合起来,将给三维建模和测量带来更大的便利。结合这两种传感器数据的前提是要能够精确地配准,即计算出各张照片在激光扫描坐标系下的外方位元素。由于在激光点云中人工精确拾取与数字影像的对应点较困难,且工作量较大,因此,寻找一种自动配准算法是必要的。本文提出的算法并不建立在显式描述的激光-图像的对应同名连接点上,而是通过将立体像对匹配点“整体”配准到由激光扫描点云描述的三维表面上,从而解算出各张相片正确的外方位元素。

1 影像与激光点云的配准

ICP 配准算法 (iterative closest point algorithm)最初由 Besl 和 Mckey^[1] 提出,是一个寻找两个三维表面点集最优匹配的几何变换的迭代优化过程。本文提出的影像与激光点云的配准方法源于 ICP 算法的思路,只是将其中一个三维点集从激光扫描点换成通过立体相对匹配获得的三维点。
假设对被扫描物体同时拍摄了一定重叠度的照片,通过立体匹配算法^[2]可获得一定数量的匹

配点,如图 1 所示(图中并未画出全部的匹配点)。

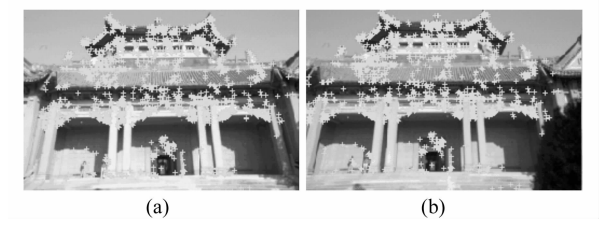


图 1 Kodak 相机拍摄的立体像对及匹配结果
Fig. 1 Stereo Image Taken by Kodak Camera and Matching Result

设激光扫描点云为 $Y=\{y_i,i=0,1,2,\cdots,n\}$, 立体像对匹配出的三维点集为 $X=\{x_i,i=0,1,2,\cdots,n\}$,其中, Y 和 X 不必具有相同数量的元素,通常 $n>m$ 。其中,激光扫描点与图像匹配的点并不是同名点(见图 2),因此,它们之间的对应关系由最邻近关系确定,并在迭代过程中不断修正。
由匹配点作单独像对的相对定向,确定两张像片的相对位置关系。通过人工在激光点云和图像间给定几个粗略的连接点,可算得一个初始空间的三维相似变换 T_0 。(也可由其他先验的知识获得),从而获得在激光扫描坐标系下初始的摄站坐标 S_1 、 S_2 和旋转矩阵 R_1 、 R_2 。前方交会出各匹配点的空间坐标,得到点集 X^0 ,计算出三维空间相似变换 $T=(\lambda,R,t)$,使得变换后的匹配点集 $X'=T(X)$ 最好地配准到扫描点云 Y 上。这个求解过程是一个典型的最优化问题,它求出使两个点

集间相似性测度代价函数最小的变换参数。实际运算时,应首先对各组数据作中心化和归一化处理。

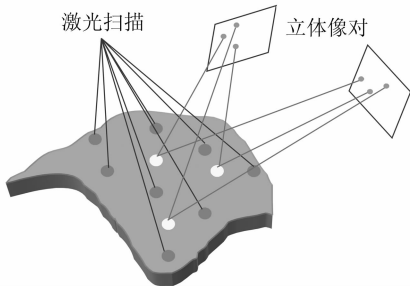


图 2 激光扫描点和由立体像对匹配生成的点
Fig.2 Laser Scanning Soints and Stereo Matched Points

2 对最邻近算法的改进

2.1 索引策略

对于激光扫描 3D 点集 Y 中的一点 y , 搜索其在立体匹配点集 X 中与之最近点 x 的时间复杂度为 $O(n)$, 则对 Y 中全部点作一次搜索的时间复杂度为 $O(mn)$ 。显然, 这在一次迭代中就很费时, 因此采用 K-D 树^[3]来加速搜索。K-D 树是二叉检索树的扩展, 它的每一层将空间分成两个。树的顶层结点按一维进行划分, 下一层结点按另一维进行划分, 以此类推, 各个维循环往复。划分要使得在每个结点, 大约有一半存储在子树中的点落入一侧, 而另一半落入另一侧。当一个结点中的点数少于给定的最大点数时, 划分结束。由于 K-D 树在范围查询(给定平行于坐标轴的闭合空间, 查询落入其中的点数)以及搜索当前位置的 m 个最邻近点都有较高的效率, 它在离散数据的表示与检索中有着广泛的应用。当使用 K-D 树作为三维空间划分的模型时, 耗费 $\theta(3 \lg n)$ 预处理时间, $\theta(3n)$ 存储, 查询 Y 中全部点在 X 中最近点的时间复杂度为 $O(3n^{2/3})$ 。其中预处理的结果在每次迭代过程中均不用改变, 由此可较大幅度地提高检索效率。由于 ICP 算法在每次迭代时都需要不断查找当前点在另一个集合中的最邻近点, 因此可由 K-D 树直接检索。

2.2 改正的误差度量准则

如何定义两点的距离误差度量准则, 直接关系到算法的效率。原始的 ICP 算法直接计算两个点在 3D 空间中的欧氏距离, 但这种度量准则在两个平行平面滑动时最终加大误差累计^[4], 而且当三维点云包括很多平面片(如航空机载扫描得到的屋顶面)时, 有可能导致不收敛。假如知

道每个点的法线方向, 而该法线和点会形成一个平面, 则可将两点间的距离替换为一点到平面的距离。当使用点到平面的距离作为误差度量准则时, 收敛的速度会加快。

由于激光扫描形成的点云要比匹配点密集, 因此, 可将此激光点集作为法线的估计来源。在两点间的欧氏向量前乘上一个误差改正矩阵, 即可得到所要的新误差度量准则:

$$D' = MD$$

式中, $M = \eta\eta^T$; η 为该激光点估计的法线方向。

法线的估计算法如下。对一个激光点 a , 按 K-D 树数据结构中取 a 周围 k 个最近的同源点集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$, 首先对 B 中每个点作中心化处理, $\bar{b}_i = b_i - \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k b_j$, 生成一个离差阵 S , 并将每个元素初始化为 0; 对每一个 \bar{b}_i , 都把 S 和它自身的外积运算结果累加到 S 上; 最后, 法线方向即为对应该离差阵 S 最小特征值的特征向量 V 。

2.3 配准中的稳健估计

设计 ICP 算法的初衷是用来配准两个部分重叠的三维点云, 而本文中的一个点集是由图像匹配生成的, 其中不可避免地存在误匹配点。如果直接使用 ICP 算法会导致不收敛或收敛到不正确的位置, 因此, 需要在迭代过程中加入稳健估计, 以抑制误匹配点的影响。

为了发现隐藏在观测值中的各种粗差, Baarda 提出了数据探测法^[5], 该方法每次可检测一个粗差, 但当有多个粗差时, 只能逐个进行检验, 计算工作量较大。本文采用 M -估计来抑制误匹配点对配准结果的影响。其估计函数的一般形式为:

$$\sum \rho(v_i) = \min \tag{1}$$

式中, v_i 为残差; $\rho(v_i)$ 为代价函数。对式(1)求导, 可得:

$$\sum \rho'(v_i) \cdot dv_i / d\hat{x} = 0 \tag{2}$$

令 $w_i = \rho'(v_i) \cdot dv_i$, $a_i = dv_i / d\hat{x}$, 式(2)可写成:

$$\sum w_i v_i a_i = 0 \tag{3}$$

由此可将 M -估计化为选权迭代的最小二乘估计, 其权函数采用 Huber 权函数^[5]。在每次迭代中, 均由最邻近的点残差修正权函数, 多次迭代后, 可逐步将误匹配点的权重减小, 从而抑制粗差对平差结果的影响。

3 实验结果

本实验采用 Riegl 公司的 LMS-Z210i 扫描仪

对武汉大学老图书馆的正面进行扫描,扫描点间隔为 10 cm,同时使用 28 mm 的 Kodak Pro14n 相机拍摄立体像对,分辨率为 4 500 像素×3 000 像素。人工在激光点云和数字影像上粗略地选取若干连接点(选取不在同一直线上的三对以上的连接点,它们之间并不要求是精确的同名点关系),计算初始外方位元素值。将激光点投影到图像,如图 3 所示,可以看出,两者并不重合。此时将立体匹配点通过初始方位元素前方交会得到三维模型点,如图 4 所示。

经本文所述的选择权最近邻点迭代算法,匹

配点云最终收敛到新的位置(图 5),重新计算各片的外方位元素。全部最邻近对应点精度的均方距离达到 5.7 cm。由于采用的是三维空间相似变换,因此并未改变两张照片间的相对定向关系。采用新外方位元素也投影激光点到右片,如图 6 所示。由于激光扫描站与拍摄照片的位置不同,因此遮挡关系有所差别,但仍然可以从投影看出所获得的新外方位元素是正确的。

将配准的数码照片的彩色信息 RGB 赋给投影的激光点,可获得彩色的三维激光点云,如图 7 所示(三维渲染的视角与扫描站和拍摄位置并不相同)。

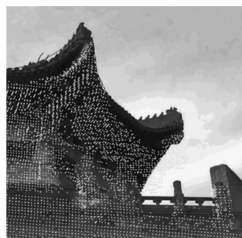


图 3 以初始外方位元素投影激光点

Fig. 3 Projecting Laser Points by Initial Parameters

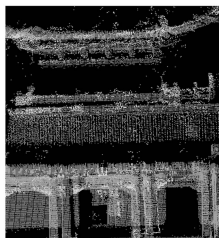


图 4 两个点云的初始位置

Fig. 4 Initial Point Clouds

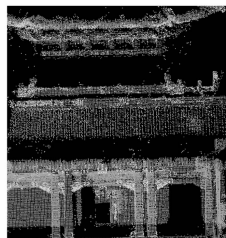


图 5 经选权最近邻迭代后的两个点云

Fig. 5 Two Point Clouds After Robust ICP

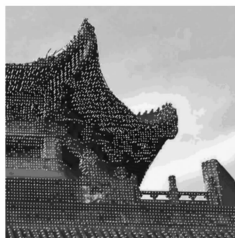


图 6 采用配准后的外方位元素投影激光点

Fig. 6 Projecting Laser Points by Right Parameters

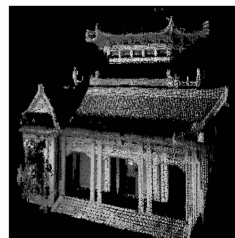


图 7 由配准图像提取彩色信息的激光扫描点云

Fig. 7 Point Cloud with Color Extracted from Aligned Image

4 结 语

本文提出的激光扫描数据和数字图像配准的方法适用于三维点云与中心投影数字影像的自动配准。它是基于立体像对匹配的点集与三维扫描点云的迭代配准。该配准方法采用选择权迭代在最邻近点搜索算法中逐步消除立体像对的误匹配粗差点的影响,得到正确的收敛结果。另外,由于本文的配准方法首先基于影像间的同名点匹配,所以使用超过两幅的多视图像会生成更多可靠的匹配点,进而获得更理想的配准结果。实验表明,本算法是可行的和有效的。

参 考 文 献

[1] Besl P J, McKay N D. A Method for Registration of 3-D Shapes[J]. IEEE Transaction on Pattern Recognition and Machine Intellegence, 1992, 14

(2): 239-256

- [2] 张祖勋, 吴晓良. 多点最小二乘匹配的可变权阵阵列松弛算法[J]. 测绘学报, 1994, 23, (3): 167-177
- [3] de Berg M, van Kreveld M, Overmars M, et al. Computational Geometry: Algorithms and Applications[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2000
- [4] Chen Yang, Medioni G. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images[C]. The Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, USA, 1991
- [5] 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002
- [6] 马颂德, 张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998

第一作者简介: 邓非, 博士。主要从事摄影测量与图像处理方面的研究工作。

E-mail: fdeng@sgg.whu.edu.cn

(下转第 296 页)

- [4] van den Heuvel F A. Vanishing Point Detection for Architectural Photogrammetry [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998,32(5):652-659

[5] Schuster R, Ansari N, Hashemi B. A Steering a Robot with Vanishing Points[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(4): 491-498

[6] Wang Lingling, Tsai W H. Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4): 370-376
- [7] 张祖勋,吴军,张剑清. 建筑场景三维重建中影像方位元素的获取方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003, 28(3): 265-271

[8] 康志忠,张祖勋. 基于灭点理论和物方平行线几何约束的建筑墙面纹理自动纠正[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2004,29(4):333-337

[9] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社,1997: 180-191
- 第一作者简介:康志忠,博士。现主要从事数字摄影测量与计算机视觉方面的研究。

E-mail:dr_zzkang@yahoo.com.cn

Resection of Imagery Along Optical Axis

KANG Zhizhong^{1,2} ZHANG Zuxun³ YANG Fanlin¹

(1 College of Geo-information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)
(2 Provincial Key Laboratory of Fundamental Geomatics and Digital Technique, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)
(3 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: An algorithm for the resection of imagery along the optical axis is presented to implement both of the camera calibration and resection at the same time. As a result, it is proven that this algorithm comes out with relatively high precision.
Key words: resection; camera calibration; vanishing point; collinearity equation

About the first author: KANG Zhizhong, Ph.D. His research field includes digital photogrammetry and computer vision.
E-mail: dr_zzkang@yahoo.com.cn

(上接第 292 页)

A Method of Registration Between Laser Scanning Data and Digital Images

DENG Fei¹ ZHANG Zuxun² ZHANG Jianqing²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

Abstract: A method for registration between laser scanning data and digital images is discussed. The registration procedure is based on aligning the stereo matched points in overlapping images and laser scanning point cloud. While taking advantage of robust ICP arithmetic, a 3D similarity transform could be calculated, then converged to the right values. A experiment shows that the algorithm is feasible and effective.
Key words: registration; laser scanning; digital image; ICP; robust estimate

About the first author: DENG Fei, Ph.D, majors in photogrammetry and ditital image processing.
E-mail: fdeng@sgg.whu.edu.cn