

三维激光点云与 CCD 影像融合的研究

邵 杰 张爱武 王书民 孟宪刚 杨玲波 王致华

(首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 提出了一种激光扫描数据和影像融合的方法,通过立体像对匹配获取精确匹配点,并与三维扫描点云进行最邻近迭代配准;在利用网格划分法进行的 K 邻近点搜索中,采用欧氏距离的选择权迭代逐步实现影像点与激光扫描点的精确配准;利用空间后方交会获取正确的外方位元素,通过摄站点、像点以及激光点之间的共线关系,在相对应影像上进行激光点的像素定位,并提取颜色属性信息。实验结果表明,该算法不但较好地实现了三维地面激光点云数据与 CCD 影像的精确融合,且对机载激光数据与影像的融合亦可行和有效。

关键词 激光光学;配准;最邻近迭代;共线方程;外方位元素;像素定位

中图分类号 TN959.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0514001

Research on Fusion of 3D Laser Point Clouds and CCD Image

Shao Jie Zhang Aiwu Wang Shumin Meng Xiangang

Yang Lingbo Wang Zhihua

(Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education,
Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract A fusion method of laser scanning and image is put forward. In this method, accurate matching point is obtained by stereo image matching firstly, and the adjacent iterative registration is finished with three-dimensional (3D) scanning points. In the searching of K adjacent point by grid partition method, the option iteration of Euclidean distance is used to gradually realize the accurate registration of image points and laser scanning points. Using the space resection for correct elements of exterior orientation, through the collinear relationship of projective center, image point and laser point, pixel location of laser point in the corresponding image is realized, and color attribute information is obtained. The experimental results show that the algorithm not only has a better performance to realize the accurate fusion of 3D surface laser points with CCD image, but also is feasible and effective for the fusion of airborne laser data with image.

Key words laser optics; registration; adjacent iteration; collinearity equation; elements of exterior orientation; pixel location

OCIS codes 140.6910; 150.0155; 280.3400

1 引 言

激光雷达能够快速获取地物的三维(3D)点坐标,并返回地物反射信号的强度,但是却难以获取地物的纹理信息,这给三维激光点云数据的处理和理解带来了很大困难^[1]。为了解决这个问题,目前的激光扫描设备基本都和数码相机结合在一起使用,

通过数码影像丰富的纹理信息来弥补三维激光点云的不足,因此,如何准确地配准两种数据便成了研究的重点。目前比较通用的方法是利用点云数据提供的高精度数字高程模型(DEM)数据直接与影像进行叠加,以实现两者的融合^[2~4]。文献[5]提出了一种基于定位定向系统(POS)数据的车载面阵 CCD

收稿日期: 2013-01-04; **收到修改稿日期**: 2013-02-04

基金项目: 国家科技支撑计划(N2012BAH31B01)和北京市教委重点项目(KZ201310028035)资助课题。

作者简介: 邵 杰(1988—),男,硕士研究生,主要从事计算机视觉、三维信息获取与应用等方面的研究。

E-mail: shaojie.1988@163.com

导师简介: 张爱武(1972—),女,博士,教授,主要从事三维信息获取与处理、计算机视觉与模式识别、图像处理等方面的研究。E-mail: zhangaw98@163.com

影像与激光点云融合处理研究的方法,该方法借助惯导系统,通过共线方程理论解算出激光点云在对应影像上的像素坐标,从而进行激光点云的颜色赋值。综合上述这些方法可发现有一个共同点,即都在先验惯导系统记录的位姿数据下,通过差分处理为影像提供高精度的外方位元素。由此可见,影像的外方位元素是实现激光点云数据与影像融合的必要前提。

文献[6]在无惯导系统的情况下,对摄像机位置和姿态进行了估计,通过运动视觉对像素点的三维坐标进行求解,并将各影像序列获取的三维点云借助迭代最近点(ICP)算法进行了点集与点集之间的配准,其中也对激光扫描的点云数据与通过影像求取到的特征三维坐标点进行了配准。文献[7]提出了一种基于ICP算法的配准方法,该方法将图像匹配过程中产生的误匹配点也加入到了算法过程中,虽然后面采用了稳健估计以抑制误匹配点,但这样不但加大了算法的复杂度,而且初始阶段也不能提供一个相对准确的初始值,很容易出现收敛不到正确位置的可能。而且基于双CCD交会测量的图像匹配复杂、作用距离近,测量精度随距离增加也会降低^[8]。本文提出的算法基于单目摄像机-激光测距传感器的测量系统^[9],不建立在显式描述激光与图像的对应同名点及先验的POS系统上,而是通过获取与影像特征点精确配准的一定数量激光扫描点,解算出各影像正确的外方位元素,然后利用激光点、像点以及摄站点之间的共线关系,在相应影像上进行激光点的像素定位,从而获取激光扫描点云的颜色属性信息,即可实现两者的融合。

2 模型建立

2.1 2D-3D配准

ICP算法最初由Besl等^[10]提出,是实现两个三维点集最优匹配的几何变换的迭代优化过程,且在三维点云匹配中被广泛应用^[11]。本文在ICP算法的思路,提出了一种适用于影像与三维激光点云精确配准的方法,即将其中一个激光扫描获取的三维点集由立体像对获得的三维点来代替。因此,也就可以间接地实现二维(2D)与3D数据之间的配准。

对于被扫描物体同时拍摄了一定重叠度的影像,通过结合基于尺度不变特征变换(SIFT)^[12]和随机抽样一致性(RANSAC)^[13]算法的立体匹配可获得一定数量的精确匹配点,从中提取若干特征点 $\mathbf{P}_1 = \{p_{1i}, i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ 及 $\mathbf{P}_2 = \{p_{2i}, i = 0, 1,$

$2, \dots, n\}$ 。设激光扫描点云为 $\mathbf{A} = \{a_i, i = 0, 1, 2, \dots, m\}$, 其中 $m > n$ 。然后通过人工在激光点云中给定若干个与图像特征点对应的粗略连接点集,可算得一个初始空间的三维相似变换矩阵 \mathbf{T}_0 , 从而可获得在激光扫描系统下初始的摄站坐标 $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ 和旋转矩阵 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$, 借助运动立体视觉^[14]原理可得到立体像对匹配出的三维点集 $\mathbf{B} = \{b_i, i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ 。激光扫描点与图像匹配点并不是同名点,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,使得点集 \mathbf{B} 能最好地配准到扫描点云 \mathbf{A} 上,从而也就实现了2D-3D的最好配准,而这个解算过程则是一个典型的最优化问题。

2.2 改进的检索策略

由于激光扫描点的数据量一般很大,而且点都处于无序的存储状态,所以理论上需要遍历整个点云,显然这种方式是非常耗时的,因此需要一种快速邻近点搜索方法。本文通过对点云的 K 邻近点求解来进行点集 \mathbf{B} 的修正,点云的 K 邻近点是指在点集中搜索某个点的 K 个最邻近点。

由于ICP算法在每次迭代时都需要不断查找当前点在另一集合中的最邻近点,这里采用对点云进行网格划分的方法^[15]开展影像特征点在扫描点云中匹配区域的 K 邻近点检索。设提取出对应区域的点有 n 个,即 $\mathbf{H}(X_i, Y_i, Z_i), i = 1, 2, \dots, n$, 将它们按 X, Y, Z 坐标值的大小进行三维排序,首先对 X 方向进行排序;若 X 值相同,则比较 Y 的值;若 Y 值相同,则比较 Z 的坐标值。若经过立体像对匹配出的三维点集 \mathbf{B} 中某一点 O 的坐标为 (r, s, t) , 设一个适当的距离阈值为 d , 那么在 X, Y, Z 方向上分别以 O 为中心, 沿着正反两个方向依次搜索得到一个点集 \mathbf{Q} , 那么该点集 \mathbf{Q} 内必然包括了点 O 的 K 邻近点, 且满足以下条件:

$$\mathbf{Q}(r_K, s_K, t_K) = \{r - d \leq r_K \leq r + d, \\ s - d \leq s_K \leq s + d, t - d \leq t_K \leq t + d\}, \quad (1)$$

式中 r_k, s_k, t_k 分别为点集 \mathbf{Q} 内 K 个点的三维排序坐标。分别在 X, Y, Z 的坐标序列中取点 O 附近一定数量的点即可保证该点 K 邻近点被取到。然后计算这些点到点 O 的距离并按从小到大排序,取前 K 个点即完成了三维点集 \mathbf{B} 中任一点的 K 邻近点获取,并取这 K 个点的平均值作为立体像对匹配点在激光扫描点云中新的位置 $O'_i(r_i, s_i, t_i)$ 。传统ICP算法主要是针对点集到点集的配准,根据残差平差和所构成的目标函数值来判断迭代是否结束,而本文的对象则是每个单点到对应区域点集的匹配过程。因

此,当出现以下情况:

$$\sqrt{(r_i - r_{i-1})^2 + (s_i - s_{i-1})^2 + (t_i - t_{i-1})^2} \leq D, \quad (2)$$

即当第 i 次迭代与第 $i-1$ 次迭代获取的两点间欧式距离小于一设定的较小阈值 D 时,则迭代结束,认为该点为影像特征点在激光扫描点中的精确匹配点。

2.3 算法流程

本文激光点云与影像融合的基本思想是建立激光点、像点以及摄站点三者之间的相互关系,通过三者间的联系进行像素定位,从而获取颜色属性信息。

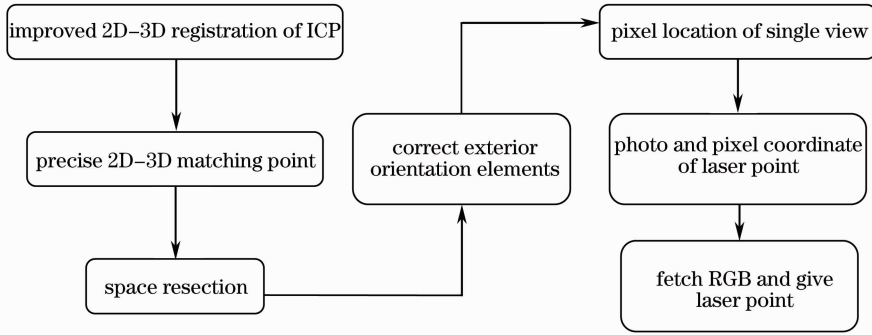


图 1 三维激光点云与影像融合算法流程

Fig. 1 Fusion algorithm process of 3D laser point and image

3 基本原理

3.1 空间后方交会及运动立体视觉

对于摄像机姿态测量问题的算法,一般可以分为三类:解析算法、迭代算法和全局优化算法^[16]。本文借助线性方程组建立误差函数,通过最小二乘

已知激光点和像点坐标,而摄站点未知,因此,首先建立激光点与像点之间的一个粗略连接关系,通过本文提出的改进 ICP 的 2D-3D 配准算法,获取一组精确的三维激光与二维影像配准点,进而得到摄像机的精确外方位元素;然后基于单视图建立三点间的共线关系,求解出三维激光点在对应影像上的像平面坐标,即可得到激光点的像素坐标值;最后通过激光点在影像上的像素坐标可获取该点的颜色属性值,即可实现激光点云数据与 CCD 影像数据的融合。三维激光点云与影像融合算法流程如图 1 所示。

的误差最小化及迭代求解未知数的最优解。而这种线性方程即共线方程,共线方程是计算机视觉与摄影测量中最基本的公式之一,表示的是物方点、像点及摄站点三点在一条直线的关系式:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X_A - X_S) + b_1(Y_A - Y_S) + c_1(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} = -f \frac{\bar{X}}{\bar{Z}}, \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X_A - X_S) + b_2(Y_A - Y_S) + c_2(Z_A - Z_S)}{a_3(X_A - X_S) + b_3(Y_A - Y_S) + c_3(Z_A - Z_S)} = -f \frac{\bar{Y}}{\bar{Z}}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 (x_0, y_0) 为投影中心在像平面上的坐标, f 为焦距, (X_A, Y_A, Z_A) 为物方点, (X_S, Y_S, Z_S) 为影像外方位元素中的位置。 $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3, c_1 \sim c_3$ 为影像姿态角的余弦函数。

以单幅影像为基础,从该影像所覆盖地面范围内若干控制点的已知地面坐标和相应点的像坐标量测值出发,根据共线条件方程,求解该影像在摄影时刻的 6 个外方位元素。为了便于计算,需要将(3)式进行泰勒级数展开,取小值一次项,使之线性化,通常将控制点的地面坐标视为真值,把相应的像点坐标视为观测值,加入相应的改正值 V_x, V_y ,可列出每个点的误差方程式,一般形式为

$$\begin{aligned} V_x &= a_{11}dX_S + a_{12}dY_S + a_{13}dZ_S + a_{14}d\varphi + a_{15}d\omega + a_{16}d\kappa - l_x, \\ V_y &= a_{21}dX_S + a_{22}dY_S + a_{23}dZ_S + a_{24}d\varphi + a_{25}d\omega + a_{26}d\kappa - l_y, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $dX_S, dY_S, dZ_S, d\varphi, d\omega, d\kappa$ 为要求解的 6 个外方位元素近似值的改正数; $l_x = (x) - x$ 为 V_x 相应的误差方程式常数项, $l_y = (y) - y$ 为 V_y 相应的误差方程式常数项,其中 $(x), (y)$ 为函数的近似值, $(x) = -f\bar{X}/\bar{Z}, (y) = -f\bar{Y}/\bar{Z}$;未知数的系数 $a_{11} \sim a_{16}, a_{21} \sim a_{26}$ 的表达式为^[17]

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(a_1 f + a_3 x), & a_{21} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(a_1 f + a_3 y), \\
 a_{12} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(b_1 f + b_3 x), & a_{22} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(b_1 f + b_3 y), \\
 a_{13} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(c_1 f + c_3 x), & a_{23} &= \frac{\partial x}{\partial X_s} = \frac{1}{Z}(c_1 f + c_3 y), \\
 a_{14} &= \frac{\partial x}{\partial \varphi} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \varphi} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \varphi} \bar{X} \right), & a_{24} &= \frac{\partial y}{\partial \varphi} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \varphi} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \varphi} \bar{Y} \right), \\
 a_{15} &= \frac{\partial x}{\partial \omega} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \omega} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \omega} \bar{X} \right), & a_{25} &= \frac{\partial y}{\partial \omega} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \omega} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \omega} \bar{Y} \right), \\
 a_{15} &= \frac{\partial x}{\partial \kappa} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \kappa} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \kappa} \bar{X} \right), & a_{25} &= \frac{\partial y}{\partial \kappa} = \frac{f}{(Z)^2} \left(\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \kappa} \bar{Z} - \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \kappa} \bar{Y} \right).
 \end{aligned} \tag{5}$$

在光束法平差过程中,针对不同数量的特征点,利用最小二乘法间接平差原理,可列出整体平差的通用原始法方程:

$$\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} \mathbf{A}_i \mathbf{X} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{P} \mathbf{L}_i \Rightarrow \mathbf{X} = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{P} \mathbf{L}_i, \tag{6}$$

式中

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{[2i-1][1]} & a_{[2i-1][2]} & a_{[2i-1][3]} & a_{[2i-1][4]} & a_{[2i-1][5]} & a_{[2i-1][6]} \\ a_{[2i][1]} & a_{[2i][2]} & a_{[2i][3]} & a_{[2i][4]} & a_{[2i][5]} & a_{[2i][6]} \end{bmatrix} \tag{7}$$

为系数矩阵; \mathbf{X} 为外方位元素近似值的改正数矩阵; \mathbf{P} 为观测值的权矩阵,反映观测值的量测精度,一般认为是等精度量测,为单位矩阵; $\mathbf{L} = [l_{x1} \ l_{y1} \ \cdots \ l_{xi} \ l_{yi}]^T$ 为误差常数项矩阵; $i = 1, 2, \dots, n$ (n 为特征点个数)。

通过(6)式可求出外方位元素近似值的改正数,并修正像片的位置和姿态参数,再逐步迭代直到改正数小于规定的限差(一般取 10^{-6}) 为止。各未知数的精度估算可以通过法方程系数矩阵求逆的方法,解出其相应的权倒数 Q_{ii} (Q_{ii} 为权倒数矩阵 Q 中参与中误差解算的具体数值),利用下式计算未知数的中误差:

$$m_i = m_0 \cdot \sqrt{Q_{ii}} = m_0 \cdot \sqrt{(\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1}_{ii}}, \quad m_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{2n-1} [V_k V_k]}{2n-6}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{2n-1} (\mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{L}_i)_k \cdot (\mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{L}_i)_k}{2n-6}}, \tag{8}$$

式中 m_i 为各参数中误差, m_0 为单位权中误差, n 为特征点数, V_k 为改正数矩阵 \mathbf{V} 中元素,其中 $\mathbf{V} = \mathbf{A}_i \mathbf{X} - \mathbf{L}_i = [V_x \ V_y]^T$ 。

运动立体视觉是基于视差原理,由三角法原理进行三维信息的获取,即由两个位置上的图像平面和被测物体之间构成一个三角形^[18]。已知两张影像的外方位元素,便可获取两个位置公共视场内物体特征点的三维坐标。设激光扫描点相应的像对像空间坐标为 $(x_1, y_1, -f)$, $(x_2, y_2, -f)$, 像空间辅助坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , 则有

$$[X_1 \ Y_1 \ Z_1]^T = \mathbf{R}_1 [x_1 \ y_1 \ -f]^T, [X_2 \ Y_2 \ Z_2]^T = \mathbf{R}_2 [x_2 \ y_2 \ -f]^T, \tag{9}$$

式中 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 为由已知的姿态元素计算的左、右像片旋转矩阵。设两影像的位置元素为 (X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}) , (X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}) , 且右摄站点在左摄站点坐标系中的坐标,即摄影基线 B 的三个坐标分量 B_X 、 B_Y 、 B_Z , 可由位置元素计算:

$$B_X = X_{S2} - X_{S1}, B_Y = Y_{S2} - Y_{S1}, B_Z = Z_{S2} - Z_{S1}. \tag{10}$$

立体像对与所摄地面点存在一定的几何关系,这种关系可以用数学表达式来描述。因立体像对中左、右像空间辅助坐标系及地面摄影测量坐标系相互平行,且摄站点、像点、激光点三点共线,令 (X, Y, Z) 为激光点像空间辅助坐标,则有

$$\frac{X_A - X_S}{X} = \frac{Y_A - Y_S}{Y} = \frac{Z_A - Z_S}{Z} = N, \tag{11}$$

式中 N 为点投影系数。设 N_1 、 N_2 分别为左右投影系数, 联立(10)、(11)式求解,可得到

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{B_X Z_2 - B_Z X_2}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1}, \\ N_2 &= \frac{B_X Z_1 - B_Z X_1}{X_1 Z_2 - X_2 Z_1}. \end{aligned} \quad (12)$$

综合(9)~(12)式即可解算出地面点的坐标值, 由于 N_1 和 N_2 是由(11)式中 X, Z 求出, 因此在计算地面点坐标时 Y_A 应取平均值。

3.2 基于单视图的像素定位

在求取摄站点精确的外方位元素后, 结合已知激光扫描点, 通过共线关系可以获得三维激光扫描点在对应影像中的几何信息。令特征点在像平面中的坐标为 (x, y) , 焦距为 f , 有

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 \mathbf{R} 为该单视图姿态角计算到的旋转矩阵。结合(11)、(13)式可列出一组关于 x, y 的二元一次方程组

$$\begin{cases} \frac{X_A - X_S}{a_1 x + a_2 y + a_3(-f)} = \frac{Y_A - Y_S}{b_1 x + b_2 y + b_3(-f)} \\ \frac{X_A - X_S}{a_1 x + a_2 y + a_3(-f)} = \frac{Z_A - Z_S}{c_1 x + c_2 y + c_3(-f)} \end{cases}, \quad (14)$$

简化为

$$\begin{cases} m_1 x + n_1 y = k_1 \\ m_2 x + n_2 y = k_2 \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} x = \frac{n_2 k_1 - n_1 k_2}{m_1 n_2 - m_2 n_1} \\ y = \frac{m_1 k_2 - m_2 k_1}{m_1 n_2 - m_2 n_1} \end{cases}, \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} m_1 &= (X_A - X_S)b_1 - (Y_A - Y_S)a_1 \\ m_2 &= (X_A - X_S)c_1 - (Z_A - Z_S)a_1 \\ n_1 &= (X_A - X_S)b_2 - (Y_A - Y_S)a_2 \\ n_2 &= (X_A - X_S)c_2 - (Z_A - Z_S)a_2 \\ k_1 &= (Y_A - Y_S)a_3(-f) - (X_A - X_S)b_3(-f) \\ k_2 &= (Z_A - Z_S)a_3(-f) - (X_A - X_S)c_3(-f). \end{aligned} \quad (17)$$

通过上面的过程即可获取三维激光点在像平面坐标系中的坐标 (x, y) , 借助像点在像平面坐标与像素坐标系下的关系式, 可实现激光点在影像上的像素定位:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 (u, v) 为激光点在影像上的像素坐标, (u_0, v_0) 为像主点坐标, dX, dY 分别为像素在 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸。

4 实验结果及分析

本实验采用 RIEGL 公司的 LMS-420i 扫描仪对苏州某地一房屋进行了扫描, 同时使用 14 mm 的 NIKON D100 相机拍摄立体像对, 分辨率为 $3008 \text{ pixel} \times 2000 \text{ pixel}$ 。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, 不要求为精确的同名点关系), 计算初始外方位元素值。图 2(a)、(b)分别为本文算法及文献[7]算法得到的初始匹配效果, 从图中可以看出本文算法能够基本重合, 而文献[7]得到的初始投影结果并不重合(数据及结论来自文献[7])。

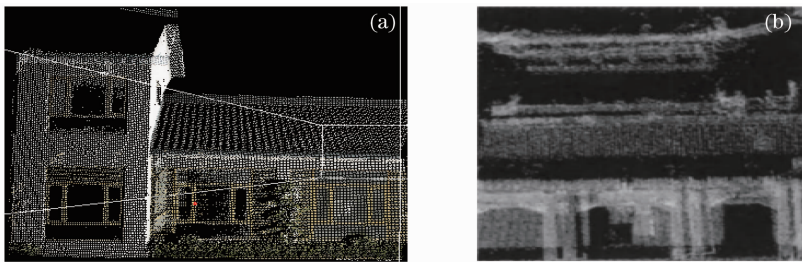


图 2 (a) 本算法初始匹配; (b) 文献[7]中两个点云初始位置

Fig. 2 (a) Initial matching in this algorithm; (b) initial point clouds in ref. [7]

然后利用本文提出的 2D-3D 配准法得到的配准点进行外方位元素的求解, 表 1 为其中一张影像的初始外方位元素以及本方法迭代后的外方位元素

各参数中误差、单位权中误差以及与观测值间的中误差对比。

表 1 外方位元素中误差
Table 1 Exterior orientation elements error

Mean square error	Initial exterior orientation elements	Iterative exterior orientation elements
Error of parameters ($\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s$) / m (φ, ω, κ) / rad	(0.167408, 0.168691, 0.158748) (0.013082, 0.013562, 0.007511)	(0.105659, 0.106150, 0.096338) (0.008171, 0.008437, 0.004710)
Error of unit weight	0.000050	0.000032
Error of observation $M = (X_C - X_M) /2$ / m	(0.120826, 0.066373, 0.046135)	(0.050698, 0.010783, 0.001475)

表 1 显示,经过本文提出的基于改进 ICP 算法的 2D-3D 配准法得到的外方位元素各项中误差皆小于由粗略连接点计算得到的初始值。其中,各参数的中误差说明本算法得出的结果变化相对更加稳定,那么可靠性也就更强;单位权中误差与位置观测值中误差则表明,经过迭代后的外方位元素更接近

真实值,可信度更高。

在进行初始及迭代后外方位元素可靠性对比后,本文最后对两种情况下的精度也进行了分析,主要是计算迭代前后激光点投影在影像上的像平面、像素坐标与最初选取的影像特征点的中误差,结果如表 2 所示。

表 2 两种情况下的像素定位结果

Table 2 Results of pixel location in two cases

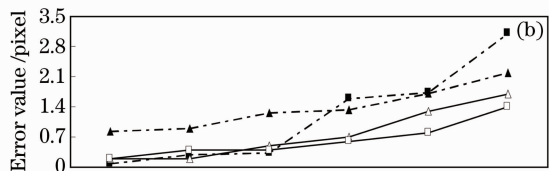
No.	Error in initial situation		Error of this paper	
	Photo coordinate	Pixel coordinate	Photo coordinate	Pixel coordinate
	$p_o = (p_C - p_M) /2$	$m_o = (o_C - o_M) /2$	$p_o = (p_C - p_M) /2$	$m_o = (o_C - o_M) /2$
1	(0.0230, 0.0184)	(3.9, 2.4)	(0.0161, 0.0046)	(1.7, 1.4)
2	(0.0126, 0.0284)	(1.6, 3.6)	(0.0016, 0.0031)	(0.2, 0.4)
3	(0.0116, 0.0198)	(1.5, 2.6)	(0.0041, 0.0012)	(0.5, 0.2)
4	(0.0318, 0.0296)	(4.2, 3.9)	(0.0015, 0.0062)	(0.2, 0.8)
5	(0.0022, 0.0164)	(0.3, 2.1)	(0.0100, 0.0008)	(1.3, 0.4)
6	(0.0140, 0.0027)	(4.6, 0.4)	(0.0058, 0.0048)	(0.7, 0.6)

从表 2 可以看出,由于粗略连接点的影响,使初始外方位元素不够精确,得到的像素定位与原始位置偏差较大,导致了激光点与影像不能很好地融合,当粗略连接点间的误差越大时,这种情况表现得也就愈加明显。而经过本文提出的最近邻迭代算法后,激光点投影的像素定位结果优于初始的情况,且中误差基本在 1 pixel 以下,由于一些不可避免的因素影响,这个误差是允许的,且 1 pixel 级别的误差完全能够满足应用需求。

(数据来自文献[6]),并将其与激光点进行配准。由于从影像中获取三维点的数据量要大于激光数据,相对于本文以少量点进行配准的方法,对所有点进行匹配的方法所耗时间则要更多。实验中,取若干点分别在类似文献[6]方法及本文方法下,对最后配准结果的像素中误差进行比较,结果如图 3(b)所示,从图中可以看出,本文方法不仅相对稳定,而且在精度上也具有一定的优势。

图 4 为利用本文方法得到的激光扫描点经过像素定位后投影到二维影像上的效果,从中可清晰地

图 3(a)为基于运动立体视觉获取的三维点集



—▲— u axis error value in ref.[6] -■- v axis error value in ref.[6]
—○— u axis error value in this paper -□- v axis error value in this paper

图 3 (a) 基于运动立体视觉的三维点及(b)像素中误差

Fig. 3 (a) 3D points based on motion stereo vision and (b) errors of pixels

看出该房屋的轮廓,且与原 CCD 影像基本吻合,影像中的特征也很容易进行辨别,这也表明了本方法的有效性及其可行性。最后三维激光点云与相应 CCD 影像数据融合的效果图如图 5 所示。

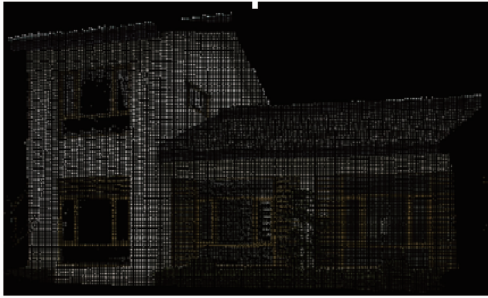


图 4 激光点在二维影像上的映射
Fig. 4 Map of laser point in 2D image

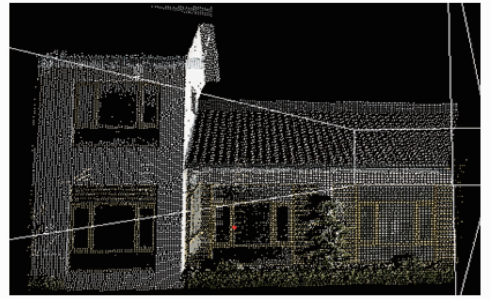


图 5 激光扫描点与影像融合

Fig. 5 Fusion of laser scanning point and image

从最后的配准整体效果可以看出,各对应特征匹配基本正确,激光点的颜色属性值也能够相互对应,其中窗框、草和树等细节特征(如图 6)的良好融合效果也从另一个角度验证了本方法获取的外方位元素的正确性以及改进 ICP 算法 2D-3D 配准的精确性。



图 6 局部激光点云、影像及融合结果

Fig. 6 Local laser point cloud, image and the fusion result

在实现地面激光扫描点与影像融合后,实验中还将本文的方法应用到了机载激光雷达数据与影像

的配准上,如图 7 所示,从最后的融合结果可看出该方法同样有效和可行。



图 7 机载激光雷达数据、影像以及融合结果

Fig. 7 Airborne lidar data, image and the fusion result

5 结 论

本文提出的数字影像和激光扫描数据配准的方法适用于无 POS 系统下的中心投影数字影像与三维点云的自动配准。它首先基于立体像对并结合 SIFT、RANSAC 算法匹配出精确的同名点,将精确图像匹配点分别与相应的三维扫描点域进行最近邻迭代配准。该配准方法采用影像与激光点之间的刚体变换在网格划分法的 K 近邻点搜索算法中逐步检索配准点,得到正确的收敛结果。最后根据得到

的配准点解算出各影像的正确外方位元素,利用摄站点、像点和激光点三点共线关系,进行激光扫描点在影像上的像素定位,也就实现了激光扫描点颜色属性信息获取。实验表明,本算法是可行和有效的,不仅适用于地面激光扫描系统,在机载激光点云与影像的配准中同样实用,对降低机载激光的成本具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Liu Shanyong. Research on laser scanning point cloud data and

- digital image sequence registration [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011, **8**(4): 92~95
- 刘善勇. 三维激光点云与序列数码影像配准方法的研究[J]. 城市勘测, 2011, **8**(4): 92~95
- 2 Gong Liang, Li Zhengguo, Bao Quanfu. Classification of LiDAR object points by fusing aerial image [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2012, **21**(1): 34~38
- 龚 亮, 李正国, 包全福. 融合航空影像的 LiDAR 地物点云分类[J]. 测绘工程, 2012, **21**(1): 34~38
- 3 Zhong Liang, Ma Hongchao, Guan Haiyan *et al.*. Bore-sight calibration based fast registration between airborne LiDAR points clouds and synchronous images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, **36**(9): 1035~1038
- 仲 良, 马洪超, 管海燕 等. 利用安置角检校进行机载 LiDAR 点云数据与同步影像快速配准[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, **36**(9): 1035~1038
- 4 Shang Dashuai, Ma Dongyang, Gao Zhenfeng *et al.*. Data fusion of point cloud and aerial image derived from LiDAR system[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2012, **21**(1): 18~20
- 尚大帅, 马东洋, 高振峰 等. 机载 LiDAR 点云数据与影像数据融合[J]. 测绘工程, 2012, **21**(1): 18~20
- 5 Hou Yanfang, Ye Zetian, Yang Yong. Research on integrated processing of vehicle-borne array CCD images and laser point cloud based on POS data[J]. *Remote Sensing Application*, 2011, (4): 76~79
- 侯艳芳, 叶泽田, 杨 勇. 基于 POS 数据的车载面阵 CCD 影像与激光点云融合处理研究[J]. 遥感应用, 2011, (4): 76~79
- 6 W. Zhao, D. Nister, S. Hsu. Alignment of continuous video onto 3D point clouds[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(8): 1305~1318
- 7 Deng Fei, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. A method of registration between laser scanning data and digital images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, **32**(4): 290~296
- 邓 非, 张祖勋, 张剑清. 一种激光扫描数据与数码照片的配准方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, **32**(4): 290~296
- 8 Jiao Hongwei, Qin Shiqiao, Hu Chunsheng *et al.*. Research on the coordinates calibration of pulse lidar and camera[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0108006
- 焦宏伟, 秦石乔, 胡春生 等. 一种脉冲激光雷达与摄像机标定方法的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0108006
- 9 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312001
- 晁志超, 伏思华, 姜广文 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312001
- 10 P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 239~256
- 11 Tan Zhiguo, Lu Min, Guo Yulan *et al.*. Multi-view point cloud scenes mosaic based on projective distribution entropy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1114003
- 谭志国, 鲁 敏, 郭裕兰 等. 基于投影分布熵的多视点三维点云场景拼接方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1114003
- 12 David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. *Int. J. Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91~110
- 13 P. J. Rousseeuw, A. M. Leroy. Robust Regression and Outlier Detection [M]. New York: Wiley Press, 2003
- 14 Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision——Computational Theory and Basic Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1998
- 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 15 Ma Liming, Xu Yi, Li Zexiang. Fast k -nearest neighbors searching algorithm for scattered points based on dynamic grid decomposition[J]. *Computer Engineering*, 2008, **34**(8): 10~11
- 马骊溟, 徐 毅, 李泽湘. 基于动态网格划分的散乱点 k 邻近快速搜索算法[J]. 计算机工程, 2008, **34**(8): 10~11
- 16 Chen Peng, Hu Guangda, Liu Xiaojun. Camera pose estimation based on virtual control points[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(11): 1108003
- 陈 鹏, 胡广大, 刘晓军. 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法[J]. 中国激光, 2012, **39**(11): 1108003
- 17 Wang Shugen. The Principles and Application of Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009
- 王树根. 摄影测量原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009
- 18 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2007
- 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2007

栏目编辑:何卓铭