

地理参考下未标定图像序列的三维点云精度分析

宋宏权, 刘学军, 闫国年, 甄艳

(南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

3D Point Clouds Accuracy Analysis Based on Uncalibrated Image Sequences in Georeference Framework

SONG Hongquan, LIU Xuejun, LÜ Guonian, ZHEN Yan

摘要: 利用计算机视觉理论与方法恢复未标定图像序列的稠密三维点云, 将其统一至地理参考下, 并分析转换结果的精度。结果表明, 此方法成本低, 精度可达厘米甚至毫米级, 可满足三维 GIS 中测量、建模与分析的需求。

关键词: 三维点云; 未标定图像序列; 运动恢复结构; 精度分析

一、引言

随着 GIS 应用的深入, 人们对地理信息的关注程度越来越高, 越来越多地要求从真三维空间来处理问题。三维 GIS 不仅突破了地理信息二维表达的束缚, 同时为空间分析与空间认知提供了新途径, 可更直观地辅助行业决策。随着雷达、激光扫描等三维遥测技术日益成熟, 三维点云已成为三维 GIS 重要的数据源^[1-4], 已应用于古建筑重建、虚拟现实、地形勘测、数字城市、城市规划等诸多领域^[5]。目前, 三维点云的获取主要采用雷达、激光扫描等方式, 其成本高, 难以满足社会化需求。如何低成本、快速、准确、有效地获取空间三维信息, 是许多学者深入研究的课题。

针对上述问题, 本文尝试利用计算机视觉理论与方法恢复未标定图像序列的稠密点云, 并将其统一至地理参考下分析其三维纠正结果的精度。

二、点云数据的三维纠正

1. 点云数据的获取

本文利用计算机视觉中的运动恢复结构(structure from motion, SFM) 与多视图立体(multi-view stereo, MVS) 三维重建技术, 对未标定图像序列进行三维重构, 得到稠密匹配点云。首先采用 SFM 开源软件 Bundler 获得各幅图像的摄像机内外参数, 再利用多视图立体开源软件 PMVS 获得图像序列的稠密三维点云, 具体流程如图 1 所示。

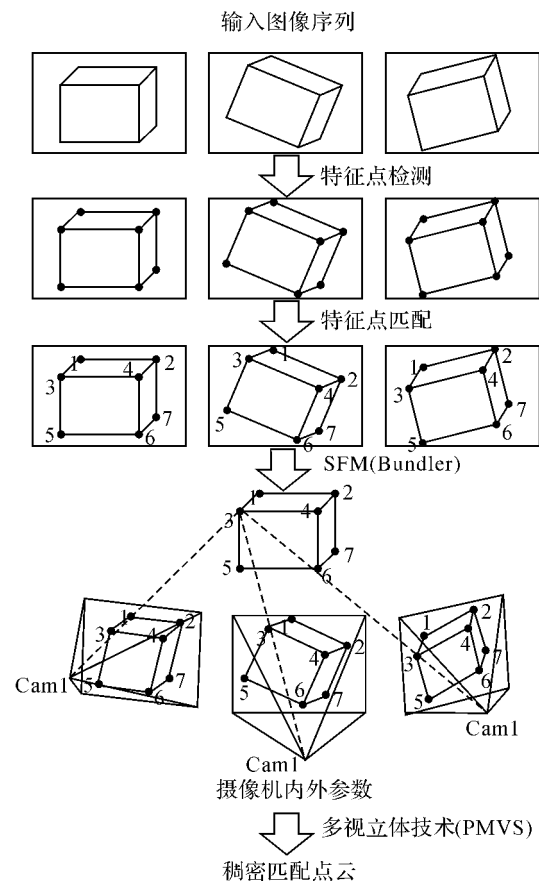


图 1 点云获取流程

2. 转换模型

初始获取的稠密点云采用的是任意摄像机坐标系, 而非 GIS 系统中的独立地方坐标系或局部工程坐标系, 为实现点云数据在 GIS 环境下的可量测,

收稿日期: 2011-08-16

基金项目: 国家科技支撑项目(2012BAH35B02); 江苏省高校自然科学基金重大基础研究资助项目(10KJA420025)

作者简介: 宋宏权(1986—), 男, 河南民权人, 博士生, 主要研究方向为视频 GIS、地理信息系统开发与应用。

需将其统一至 GIS 系统坐标系。由于摄像机坐标系与 GIS 系统坐标系之间的欧拉角较大,因此在三维纠正中不能采用小角度空间直角坐标转换模型。本文采用陈义等^[6]提出的适用于大旋转角的三维基准转换模型。该模型不仅可实现大角度的转换,且计算过程简单,便于程序实现。

3. 特征点精度评定

选取特征点是坐标转换中的一个重要步骤,其精度对转换模型精度有较大影响。本文采用手工点取方式选择与控制点对应的特征点。为分析特征点选取精度,对每个特征点选取 n 次,由式(1) 求算特征点的选取误差

$$\sigma_p = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2 + \sigma_{z_i}^2)}{3n}} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \sigma_{z_i}$ 分别表示第 i 次选取的某特征点在 x, y, z 轴上分量与 n 次选取结果分量均值的差值; σ_p 表示所选特征点的离散程度,即中误差。其值越大,表明分布越离散,即选取的特征点精度越差;反之,则说明点的分布越集中,即所选取的特征点精度越高。

4. 转换模型精度评定

坐标转换模型对点云转换结果的质量起决定性影响,本文采用式(2) 分析转换模型的精度

$$\sigma_m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{x_i}^2 + \Delta_{y_i}^2 + \Delta_{z_i}^2)}{3n}} \quad (2)$$

式中 $\Delta_{x_i}, \Delta_{y_i}, \Delta_{z_i}$ 分别为第 i 个特征点转换前后在 X, Y, Z 3 个方向的差值; n 为选取的特征点个数。 σ_m 值越大,则转换精度越低;反之,则转换精度越高。

三、试验结果与精度分析

1. 试验数据

本试验数据为普通数码相机从不同角度拍摄的 15 幅南京师范大学仙林校区百年校庆纪念鼎图像,图 2 为示例图像。利用上述技术流程获取的图像序列稠密点云如图 3 所示。



图 2 试验数据示例

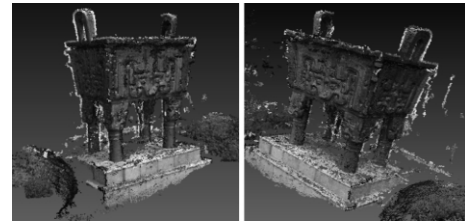


图 3 未纠正稠密点云三维显示

为实现点云在 GIS 系统中的准确定位,需首先选取控制点。本试验采用高斯-克吕格投影将鼎底中心点经纬度坐标投影在 GIS 环境下,以该点为中心,根据实测的不同层次鼎体已知长、宽、高,分别计算用于求取转换模型的控制点坐标,最终得到表 1 所示的 12 个控制点。

表 1 控制点三维坐标表

点号	X	Y	Z	m
1	680 400.549	3 554 692.572	26	
2	680 402.448	3 554 692.57	26	
3	680 402.444	3 554 693.885	26	
4	680 400.544	3 554 693.885	26	
5	680 400.496	3 554 692.515	27.229 47	
6	680 402.503	3 554 692.515	27.229 47	
7	680 402.501	3 554 693.944	27.229 47	
8	680 400.494	3 554 693.942	27.229 47	
9	680 400.457	3 554 692.482	27.295 5	
10	680 402.538	3 554 692.482	27.295 5	
11	680 402.535	3 554 693.965	27.295 5	
12	680 400.466	3 554 693.972	27.295 5	

2. 特征点精度分析

由于点云的离散性,只选取一次作为特征点具有很大的随机性。因此,多次选取并采用均值作为特征点将会提高特征点选取精度。本文对每个特征点选取 10 次,以均值作为相应特征点坐标。各特征点的均值坐标、选取中误差及特征点总体中误差如表 2 所示。

表 2 特征点坐标及选取中误差

点号	X/m	Y/m	Z/m	中误差/mm
1	-0.551 698	-30.331 05	-4.856 616	±6.905 1
2	-1.313 487	-30.874 47	-4.931 589	±5.759 4
3	-0.954 012	-31.375 57	-4.999 495	±11.887 1
4	-0.200 883	-30.822 26	-4.924 99	±10.410 7
5	-0.572 261	-30.358 89	-4.220 406	±4.705 5
6	-1.366 128	-30.956 98	-4.323 071	±3.211 2
7	-0.958 697	-31.535 95	-4.407 087	±8.079 1
8	-0.146 353	-30.929 99	-4.328 024	±6.797 4
9	-0.557 59	-30.319 46	-4.184 388	±9.421 4
10	-1.413 579	-30.955 22	-4.288 124	±9.238 3
11	-0.091 656	-30.903 07	-4.300 645	±5.453 1
12	-0.967 935	-31.581 81	-4.388 396	±9.048 1
$\sigma_m = \pm 7.959 2 \text{ mm}$				

可见,特征点选取精度在毫米至厘米级,总体中误差为 ±7.959 2 mm,利用所确定特征点与控制点求算转换模型,其精度不会超过厘米级。

3. 坐标转换与转换模型精度

根据特征点与控制点对应关系,利用转换模型

$$M = \begin{bmatrix} 0.810\ 506\ 748\ 043\ 499 & 0.578\ 537\ 381\ 928\ 062 & 0.091\ 505\ 786\ 863\ 441\ 1 \\ -0.605\ 459\ 230\ 250\ 409 & 0.784\ 949\ 511\ 101\ 058 & 0.124\ 596\ 160\ 864\ 094 \\ -0.001\ 286\ 751\ 031\ 272\ 04 & 0.152\ 508\ 744\ 235\ 809 & -0.988\ 410\ 253\ 360\ 297 \end{bmatrix}$$

式中 μ 为尺度因子; (X_0, Y_0, Z_0) 为平移向量; M 为旋转矩阵。利用转换模型对原始稠密点云进行坐

和约束条件求得转换系数分别为

$$\mu = -1.998\ 633\ 874\ 054\ 45$$

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 680\ 363.698\ 427\ 872 \\ 3\ 554\ 644.529\ 604\ 21 \\ 26.334\ 768\ 627\ 334\ 5 \end{bmatrix}$$

标转换,特征点转换后坐标与相应实测控制点坐标如表 3 所示。

表 3 特征点转换后与控制点坐标表

点号	转换后坐标			实测控制点坐标		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	680 400.551 7	3 554 692.656	25.984 430 89	680 400.549	3 554 692.572	26
2	680 402.427 7	3 554 692.605	26.000 004 22	680 402.448	3 554 692.57	26
3	680 402.437 3	3 554 693.843	26.019 522 28	680 402.444	3 554 693.885	26
4	680 400.563 9	3 554 693.868	25.999 987 59	680 400.544	3 554 693.885	26
5	680 400.500 8	3 554 692.516	27.249 677 8	680 400.496	3 554 692.515	27.229 47
6	680 402.497 1	3 554 692.519	27.227 127 83	680 402.503	3 554 692.515	27.229 47
7	680 402.522	3 554 693.941	27.238 679 88	680 402.501	3 554 693.944	27.229 47
8	680 400.490 9	3 554 693.954	27.212 253 47	680 400.494	3 554 693.942	27.229 47
9	680 400.424 9	3 554 692.463	27.308 849 39	680 400.457	3 554 692.482	27.295 5
10	680 402.565 6	3 554 692.45	27.295 506 09	680 402.538	3 554 692.482	27.295 5
11	680 402.586 5	3 554 693.998	27.289 558 18	680 402.535	3 554 693.965	27.295 5
12	680 400.366 2	3 554 693.971	27.258 275 08	680 400.466	3 554 693.972	27.295 5

利用上述精度评价模型,实测控制点坐标与转换后坐标在 X、Y、Z 轴的差值及转换模型中误差如表 4 所示,转换模型中误差为 ±2.965 7 cm,可以满足测量工作的需求。

表 4 特征点转换前后差值与转换模型中误差 m

点号	ΔX	ΔY	ΔZ
1	0.002 657 27	0.083 564 298	-0.015 569 11
2	-0.020 256 669	0.034 932 01	0.000 004 22
3	-0.006 738 93	-0.042 021 506	0.019 522 28
4	0.019 853 337	-0.017 267 764	-0.000 012 41
5	0.004 804 423	0.000 926 727	0.020 207 80
6	-0.005 867 926	0.004 141 047	-0.002 342 17
7	0.020 950 951	-0.002 604 447	0.009 209 88
8	-0.003 091 016	0.012 070 729	-0.017 216 53
9	-0.032 140 886	-0.019 148 015	0.013 349 39
10	0.027 571 848	-0.031 742 708	0.000 006 09
11	0.051 524 19	0.032 508 892	-0.005 941 82
12	-0.099 830 266	-0.000 791 092	-0.037 224 924
$\sigma_m = \pm 2.965\ 7\ \text{cm}$			

为评估转换后点云数据的精度,利用已知数

据,在 GIS 系统中通过多次量测来评价转换后点云数据的质量。对鼎体各层次的长、宽、高分别进行 5 次量测,并根据已知真实值求算中误差,结果如表 5 所示。由表 5 可知,转换后的点云数据在 GIS 环境下长度量测中误差为毫米至厘米级,总体中误差为毫米级,能够满足测量工作的需求。

四、结论与讨论

通过试验及结果分析可知:① 利用未标定图像序列获取地物目标的三维点云数据是可行的,且工作流程简单、成本低;② 通过三维纠正,其精度可达厘米甚至毫米级,能够满足测量工作的需求;③ 丰富了三维空间数据采集的方法。

本文只是从三维纠正的角度分析了点云精度,如何从测绘的角度以误差传播理论来分析未标定图像序列点云的获取精度,有待于进一步研究。计算机视觉的研究目标是使计算机具有通过二维图像认知三维环境信息的能力,不仅能够感知三维环

(下转第 20 页)

云提取率可达到96.5% 拟合的电力线能很好地与电力线点云吻合,达到了良好的效果,具有一定的工程应用价值。但是该算法也有一定缺陷,对原始数据有严格要求,对点云密度大的数据提取效果比较好,中间有缺失的点云数据则提取效果相对较差。考虑到电力线提取能够在将来电力巡线中有较大的普遍适用性,还须对该方法作进一步改进。

参考文献:

[1] 孙晓云,王晓冬.应用 LIDAR 数据中提取电网信息方法初探[J].测绘技术装备,2010,12(1):27-29.
 [2] MCLAUHLIN R A. Extracting Transmission Lines from Airborne LiDAR Data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2006,3(2):222-226.
 [3] JWA Y,SOHN G,KIM H. Automatic 3D Powerline Reconstruction Using Airborne LiDAR Data [J]. IAPRS,2009,XXXVIII:105-110.
 [4] MELIER T,BRIESE C. Extraction and Modeling of Power

Lines from ALS Point Clouds [C]//Proceedings of 28th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition. Hagenberg [s. n.]2004.
 [5] PETZOLD B,AXELSSON P. Result of the OEEPE WG on Laser Data Acquisition [J]. IAPRS,2000,33(B3):718-723.
 [6] ELBERINK S,MASS H G. The Use of Anisotropic Height Texture Measures for the Segmentation of Airborne Laser Scanner Data [J]. IAPRS,2000,33(B3):678-684.
 [7] 叶岚,刘倩,胡敬武.基于 LIDAR 点云数据的电力线提取和拟合方法研究[J].测绘与地理空间信息,2010,33(5):30-34.
 [8] 蓝曾荣,胡庆武.基于机载 LiDAR 的数字电网巡线应用研究[C]//第一届全国激光雷达对地观测高级学术研讨会论文集.北京:[s. n.]2010:382-387.
 [9] 欧同庚,耿学贤,杨博雄.车载数据采集系统在电力线检测中的应用[J].大地测量与地球动力学,2009,29(2):149-151.

(上接第16页)

境中目标对象的几何信息,如形状、位置、姿态、运动等,且能够对它们进行识别与理解。因此,将 GIS

与计算机视觉、模式识别等结合发展视频 GIS 将成为 GIS 领域新的研究方向。

表5 GIS环境下点云精度评价

编号	测量次数					真实值/cm	中误差/mm
	1/cm	2/cm	3/cm	4/cm	5/cm		
A	189.766	188.862	189.367	190.942	188.851	189.25	±8.3097
B	129.319	131.298	129.974	128.511	130.966	130.85	±13.2638
C	200.308	200.068	199.655	199.974	201.000	200.71	±6.8009
D	141.361	141.826	143.201	141.216	142.288	142.23	±7.6063
E	208.324	206.064	207.761	206.853	206.668	206.80	±8.7270
F	147.854	149.126	148.223	147.900	150.113	148.19	±9.7695
G	123.326	123.465	122.954	122.961	123.202	123.27	±2.1960
H	129.172	129.362	129.504	129.696	129.719	129.55	±2.1458

$\sigma_m = \pm 8.1403 \text{ mm}$

参考文献:

[1] 李必军,方志祥,任娟.从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2003,28(1):65-70.
 [2] 古林玉,卢小平,李英成,等.基于 LiDAR 点云与特征线的 DEM 更新方法[J].测绘通报,2011(2):17-20.
 [3] 杨必胜,魏征,李清泉,等.面向车载激光扫描点云快速分类的点云特征图像生成方法[J].测绘学报,2010,39(5):540-545.
 [4] 隋立春,张熠斌,柳艳,等.基于改进的数学形态学算

法的 LiDAR 点云数据滤波[J].测绘学报,2010,39(4):390-396.
 [5] GAULTON R,TIM J M. LiDAR Mapping of Canopy Gaps in Continuous Cover Forests: A Comparison of Canopy Height Model and Point Cloud Based Techniques [J]. International Journal of Remote Sensing,2010,31(5):1193-1211.
 [6] 陈义,沈云中,刘大杰.适用于大旋转角的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.