

文章编号: 1001-1595(2011)03-0345-07

车载 GPS/IMU/LS 激光成像系统外方位元素的动态标定

叶泽田¹, 杨 勇², 赵文吉², 侯艳芳¹

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 2. 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

Dynamic Calibration of Exterior Orientations for Vehicle GPS/IMU/LS Laser Imaging System

YE Zetian¹, YANG Yong², ZHAO Wenji², HOU Yanfang¹

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 2. The Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: A calibration method with small rotation-angle corrections for the exterior orientations of vehicle laser imaging system was proposed. In the vehicle laser imaging system, mobile surveying and mapping platform system (MSMP), integrated GPS with both IMU (inertial measurement unit) and LS (laser scanner), the method used six small rotation-angle parameters and six small translation parameters to correct the parameters of traditional models. The experiments show that the new method efficiently corrected the installation errors and temporal synchronizing errors in the system.

Key words: vehicle laser imaging system; exterior orientation; calibration; small rotation-angle

摘 要: 提出一种带有微小转角修正的车载激光成像系统外方位元素标定方法。针对全球定位系统(GPS)、惯性测量单元(IMU)和激光扫描仪(LS)集成的车载激光成像系统(车载移动测绘系统),该方法使用 6 个微小旋转角参数和 6 个微小平移参数对传统标定模型参数进行修正。试验数据表明,方法可对系统的安装误差和时间同步误差进行有效改正。

关键词: 车载激光成像系统; 外方位元素; 标定; 微小转角

中图分类号: P234

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z324); 中国测绘科学研究院专项科研经费

1 引 言

激光具有非常精确的测距能力,可以快速、方便、准确地获取被测物体的空间三维坐标。随着激光技术和测绘技术的进步,采用红外波长工作的激光扫描仪被用来构建车载激光成像系统,越来越多地应用于移动测图系统(mobile mapping system, MMS)之中。这些系统包括加拿大 Optech 的 LYNX 系统,德国 3D-Mapping 的 MoSES 系统,IGI 和 3DLM 合作开发的 Street-Mapper 系统,Topcon 的 IP-S2 系统和日本东京大学的 VLMS 系统等。

标定是保证车载移动测图系统获取精确数据的重要环节。测图系统中的标定包括内方位元素(内参数)标定和外方位元素(外参数)标定,其目的是高精度地确定两个或多个对象之间的相对位置关系。文献[1]将车载系统的标定分为激光扫描仪(或相机)的内参数标定、激光扫描仪与相机融合的标定和激光扫描仪(或相机)与 GPS/IMU

的外参数标定,并给出了标定过程。文献[2]将标志点置于玻璃上对激光扫描仪外参数进行标定。文献[3-4]对激光扫描仪外参数进行标定应用在 VLMS 系统中。美国华盛顿大学的机器人研究室在 2004 年最先在基于雷达原理的激光扫描仪和面阵 CCD 相机标定的领域内进行研究,实现激光扫描仪与面阵 CCD 相机融合的标定^[5]。国内的研究者通过激光扫描仪与相机融合的标定用于数据处理和三维可视化^[6-9]。文献[10]探讨车载系统激光扫描仪外参数的标定方法,但未结合 GPS/IMU 进行标定试验。

面阵相机成像时,一次可获取同一时刻的一幅图像,该图像对应一组外方位元素,在图像上标志点易于确定,因此利用一幅图像应用空间后方交会法即可标定出外方位元素。而对激光扫描仪来说,同一时刻只能得到一个点的数据,无法直接利用空间后方交会法求取外方位元素。激光扫描生成的点云图在没有结合 GPS/IMU 数据时其标志点判读较为困难,目前将激光扫描仪与 GPS/

IMU 结合进行标定的并不多,方法也不成熟。本文将激光扫描时间作为变量引入到激光点云数据中,用于控制点的判读,提出一种带有微小转角修正的激光成像系统外方位元素标定方法。

2 车载激光扫描成像系统结构

本文研究是基于课题组研制的车载移动测绘系统(mobile surveying and mapping platform system, MSMP)进行的,MSMP是多传感器集成系统,由定位定姿传感器和遥感传感器两部分组成^[11]。定位定姿传感器包括惯性测量单元和GPS,它们组成位置姿态测量系统(positioning and orientation system, POS),或称为定位定姿系统,用于获取系统时间、系统平台位置和姿态;遥感传感器包括激光扫描仪和CCD相机,激光扫描仪获取目标地物的空间三维坐标数据,CCD相机获取目标地物的图像纹理数据。本文的研究主要涉及该系统中由GPS/IMU/LS组成的三维激光扫描成像系统的外方位元素的标定问题。系统中使用的激光扫描仪为SICK LMS291型号(如图1),它采用红外激光工作,其工作中心波长为905 nm。GPS、IMU和LS等传感器的部分技术指标列于表1。



图1 SICK LMS291 激光扫描仪

Fig.1 SICK LMS291 laser scanner

表1 传感器技术指标

Tab.1 Data of sensors

传感器	型号	技术指标
GPS	NovAtel DL4	采集频率: 20 Hz
IMU	星网宇达 XW-ADU7610	采集频率: 100 Hz 距离分辨率: 10mm/typ.35mm 最大距离: 80 m
LS	SICK LMS 291	角度分辨率: 0.25° 最大观测角: 100°

3 车载激光扫描成像系统外方位元素标定方法

3.1 坐标系统定义

车载激光扫描成像系统标定中涉及下述三个坐标系统。

(1) 激光直角坐标系(l):该坐标系由激光扫描仪的仪器轴向来确定。原点对应激光扫描仪的激光发射点或零距离处, x 轴在扫描面内指向主扫描方向, y 轴垂直于扫描面指向车行方向, z 轴在扫描面内垂直于主扫描方向指向上方。

(2) POS坐标系(p):该坐标系由GPS天线位置和IMU的轴向来确定。原点位于GPS天线中心, x 轴、 y 轴和 z 轴方向由IMU的三轴方向确定。

(3) 大地坐标系(c):选用WGS-84高斯克吕格3°带投影坐标系。用于标定处理的点云坐标和全站仪测量坐标均是在该坐标系中表示。

3.2 基本原理

标定的目的是确定激光扫描仪(LS)与定位定姿系统(POS)之间的相对位置姿态关系,POS与大地坐标系之间的相对位置姿态关系。激光扫描仪与定位定姿系统之间的相对位置姿态关系用激光直角坐标系与POS坐标系之间的关系来表示;POS与大地坐标系之间的相对位置姿态关系用POS坐标系与大地坐标系之间的关系来表示。车载系统中的误差主要有各传感器系统误差、安装误差和时间同步误差。仪器安装误差和时间同步误差是车载激光成像系统外方位标定涉及的主要系统误差,前者影响空间同步精度,后者影响时间同步精度。它们均对车载系统测量的点云数据精度产生影响。传统标定模型没有考虑时间同步误差,为修正后两项误差,引入微小转角的概念,对静态或未顾及时间同步误差的标定结果进行修正或利用概略值进行直接标定。

在摄影测量中,微小转角起极大的作用^[12]。利用微小转角,对各转角的近似值 φ^0 、 ω^0 、 κ^0 ,按其各角的改正值 $d\varphi$ 、 $d\omega$ 、 $d\kappa$ 进行修正,则修正后的旋转矩阵 R 为

$$R = dR \cdot R^0 \quad (1)$$

式中,参数或变量的上标0表示其对应的近似值或初值; R^0 为转角近似值对应的初始旋转矩阵; dR 为微小转角改正值 $d\varphi$ 、 $d\omega$ 、 $d\kappa$ 对应的修正旋转矩阵。

在式(1)的基础上,建立式(2)所示的车载激光扫描成像系统的外参数标定模型,该模型表示

待标定参数的近似值与修正值之间应满足的关系

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = d\mathbf{R}_{pc}\mathbf{R}_{pc}^0 \left(d\mathbf{R}_{lp}\mathbf{R}_{lp}^0 \begin{bmatrix} X_{LS} \\ Y_{LS} \\ Z_{LS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{lp} \\ Y_{lp} \\ Z_{lp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX_{lp} \\ dY_{lp} \\ dZ_{lp} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_{pc} \\ Y_{pc} \\ Z_{pc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX_{pc} \\ dY_{pc} \\ dZ_{pc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, 下标 l, p, c 分别表示激光直角坐标系、由 GPS/IMU 确定的 POS 坐标系和大地坐标系; 矢量 $[X_c \ Y_c \ Z_c]^T$ 表示激光扫描点在大地坐标系中的坐标; $\mathbf{R}_{pc}^0, d\mathbf{R}_{pc}$ 分别表示 POS 坐标系相对于大地坐标系的初始旋转矩阵和修正旋转矩阵; $\mathbf{R}_{lp}^0, d\mathbf{R}_{lp}$ 分别表示激光直角坐标系相对于 POS 坐标系的初始旋转矩阵和修正旋转矩阵; 矢量 $[X_{LS} \ Y_{LS} \ Z_{LS}]^T$ 表示激光扫描点在激光直角坐标系中的坐标; 矢量 $[X_{lp} \ Y_{lp} \ Z_{lp}]^T$ 、 $[dX_{lp} \ dY_{lp} \ dZ_{lp}]^T$ 分别表示激光直角坐标系相对于 POS 坐标系的初始位置偏移量和位置偏

移量修正值; 矢量 $[X_{pc} \ Y_{pc} \ Z_{pc}]^T$ 、 $[dX_{pc} \ dY_{pc} \ dZ_{pc}]^T$ 分别表示 POS 坐标系相对于大地坐标系的初始位置偏移量和位置偏移量修正值。设 POS 坐标系相对于大地坐标系的微小转角修正值为 $d\varphi_1, d\omega_1, d\kappa_1$, 设激光直角坐标系相对于 POS 坐标系的微小转角修正值为 $d\varphi_2, d\omega_2, d\kappa_2$, 则其对应的修正旋转矩阵 $d\mathbf{R}_{pc}$ 和 $d\mathbf{R}_{lp}$ 可分别表示为

$$d\mathbf{R}_{pc} = \begin{bmatrix} 1 & -d\kappa_1 & -d\varphi_1 \\ d\kappa_1 & 1 & -d\omega_1 \\ d\varphi_1 & d\omega_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d\mathbf{R}_{lp} = \begin{bmatrix} 1 & -d\kappa_2 & -d\varphi_2 \\ d\kappa_2 & 1 & -d\omega_2 \\ d\varphi_2 & d\omega_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 标定参数求解

将式(3)和式(4)代入式(2), 可得 12 参数标定模型中待求改正数与其他状态变量、激光点坐标测量值之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} X_{WGS84} &= \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{Q} + \Delta X_{pc} \\ X_{WGS84} &= [X_c \ Y_c \ Z_c]^T \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} P_{a3}T_1 - P_{a1}T_3 & P_{a3}T_2 - P_{a2}T_3 & P_{a2}T_1 - P_{a1}T_2 & P_{a1} & P_{a2} & P_{a3} & -Q_3 & 0 & -Q_2 & 1 & 0 & 0 \\ P_{b3}T_1 - P_{b1}T_3 & P_{b3}T_2 - P_{b2}T_3 & P_{b2}T_1 - P_{b1}T_2 & P_{b1} & P_{b2} & P_{b3} & 0 & -Q_3 & Q_1 & 0 & 1 & 0 \\ P_{c3}T_1 - P_{c1}T_3 & P_{c3}T_2 - P_{c2}T_3 & P_{c2}T_1 - P_{c1}T_2 & P_{c1} & P_{c2} & P_{c3} & Q_1 & Q_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{x} &= [d\varphi_1 \ d\omega_1 \ d\kappa_1 \ dX_{lp} \ dY_{lp} \ dZ_{lp} \ d\varphi_2 \ d\omega_2 \ d\kappa_2 \ dX_{pc} \ dY_{pc} \ dZ_{pc}]^T \\ \mathbf{Q} &= [Q_1 \ Q_2 \ Q_3]^T \\ \Delta X_{pc} &= [X_{pc} \ Y_{pc} \ Z_{pc}]^T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, X_{WGS84} 为激光测量点在大地坐标系中的坐标向量; \mathbf{B} 为系数矩阵; \mathbf{x} 为动态标定中的 12 个待求参数对应的改正数向量; ΔX_{pc} 为 POS 坐标系相对于大地坐标系的位置偏移初值向量; \mathbf{Q} 为与其他状态变量有关的向量。

式(5)中, 其他几个有关的参数可由式(6)~式(9)确定

$$\mathbf{R}_{pc}^0 = \begin{bmatrix} P_{a1} & P_{a2} & P_{a3} \\ P_{b1} & P_{b2} & P_{b3} \\ P_{c1} & P_{c2} & P_{c3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

矩阵 \mathbf{R}_{lp}^0 为 POS 坐标系相对于大地坐标系的初始旋转矩阵

$$\mathbf{R}_{lp}^0 = \begin{bmatrix} L_{a1} & L_{a2} & L_{a3} \\ L_{b1} & L_{b2} & L_{b3} \\ L_{c1} & L_{c2} & L_{c3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵 \mathbf{R}_{lp}^0 为激光直角坐标系相对于 POS 坐标系的初始旋转矩阵

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{lp}^0 \begin{bmatrix} X_{LS} \\ Y_{LS} \\ Z_{LS} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{a1}T_1 + P_{a1}X_{lp} + P_{a2}T_2 + P_{a2}Y_{lp} + P_{a3}T_3 + P_{a3}Z_{lp} \\ P_{b1}T_1 + P_{b1}X_{lp} + P_{b2}T_2 + P_{b2}Y_{lp} + P_{b3}T_3 + P_{b3}Z_{lp} \\ P_{c1}T_1 + P_{c1}X_{lp} + P_{c2}T_2 + P_{c2}Y_{lp} + P_{c3}T_3 + P_{c3}Z_{lp} \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(5)可列出误差方程式, 其误差方程式的矩阵形式为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{x} - \mathbf{L} \quad (10)$$

式中, $V = [V_x \ V_y \ V_z]^T$ 为激光扫描测量点坐标误差改正数向量; B 为系数矩阵; x 为动态标定中的待求参数对应的改正数向量, 其意义与式(5)中的表示相同; $L = [X_c - (Q_1 + X_{pc}) \ Y_c - (Q_2 + Y_{pc}) \ Z_c - (Q_3 + Z_{pc})]^T$ 为常数项向量。

利用最小二乘间接平差原理, 在观测值为等权的情况下, 根据足够数量的、分别由激光扫描成像系统测量的和由全站仪测量的对应控制点数据, 利用式(10)可得 x 的解为

$$x = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (11)$$

实际计算中, 一般经过若干次迭代计算, 即可获得满足一定精度要求的状态参数对应的改正数, 并确定模型中需要进行动态标定的外方位参数。

4 试验及结果分析

根据本文提出的标定方法, 在户外标定场中进行车载激光扫描成像试验, 获取激光扫描数据和 GPS/IMU 数据。标定试验中选取 7 个控制点

数据进行解算, 选取的控制点主要为地物特征点(地物角点)和特制的多面体靶标。将激光扫描时间作为变量引入到激光点云数据中, 用于在激光直角坐标系中进行控制点的判读; 利用安置于高精度已知点上的全站仪测量所有控制点在大地坐标系下的坐标(见表 2)。用于安置全站仪的已知点采用 GPS 静态测量方法进行测量, GPS 和所用全站仪的坐标测量精度均达毫米级。控制点在原始激光点云图中的定位则利用点云显示软件人工判读确定, 其定位精度与点云的分布密度有关。

将表 2 中的控制点测量数据应用于上述 12 参数标定模型求解, 即可得出标定结果(见表 3)以及控制点坐标经系统标定改正后的中误差。同时, 利用控制点之间的距离真值和测量值进行分析, 以距离测量中误差来评估相对测量精度, 可求得激光扫描成像系统的相对测量精度。本文采用控制点和检查点的坐标测量中误差来评估标定的精度, 精度分析结果列于表 4。

表 2 控制点测量数据

Tab. 2 Measurements of control points

激光测量控制点数据(激光直角坐标系)			全站仪测量控制点数据(大地坐标系)		
水平距离/m	时间/s	垂直高度/m	北/m	东/m	高/m
10.163 6	365 663.885 9	- 0.577 1	4 420 013.971	433 668.792	61.504
9.944 0	365 673.970 1	- 0.564 7	4 420 013.714	433 643.816	62.167
9.993 8	365 676.476 7	- 0.962 3	4 420 013.521	433 637.205	61.910
10.530 9	365 677.596 4	- 1.293 0	4 420 013.379	433 633.256	61.590
6.724 6	365 687.996 4	- 1.833 3	4 419 984.709	433 638.969	60.902
6.072 5	365 690.396 5	- 1.856 6	4 419 984.780	433 645.556	60.724
5.765 8	365 692.850 0	- 1.929 2	4 419 984.893	433 652.117	60.515

表 3 12 参数标定结果

Tab. 3 Results of 12 parameter calibration

	旋转参数			平移参数		
	yaw/(°)	pitch/(°)	roll/(°)	X/m	Y/m	Z/m
las 至 pos	- 0.006 025	0.077 464	- 0.088 393	- 0.021 851	0.506 100	- 0.165 674
pos 至 wgs	0.004 120	0.007 745	- 0.008 457	- 0.189 362	- 0.068 091	- 0.011 187

注: las 表示激光直角坐标系; pos 表示 POS 坐标系; wgs 表示 WGS 84 大地坐标系。

表 4 12 参数标定精度

Tab. 4 Precision of 12 parameter calibration m

激光测量点经标定处理后的坐标中误差		距离测量中误差	
X	Y	Z	相对精度
0.046 672	0.005 943	0.019 209	0.031 109

表 3 中的旋转参数 yaw、pitch、roll 分别表示两坐标系间相应的转角即航向角、俯仰角和横

滚角; 平移参数 X、Y、Z 分别表示两坐标系间相应的原点平移坐标分量。

列于表 4 中的标定精度结果是基于对控制点的测量进行的。利用控制点在激光直角坐标系下的坐标值和表 3 中的标定参数等可得到经系统标定处理后的控制点在大地坐标系下的坐标值; 相应地用全站仪测量控制点的大地坐标; 以全站仪

测量的控制点相应大地坐标为真值, 得到激光测量点经系统误差改正后的 X 、 Y 、 Z 坐标中误差分别为 0.046 672 m、0.005 943 m 和 0.019 209 m; 当以全站仪测量的控制点之间的距离为距离真值, 而以激光测量点经系统误差改正后的控制点之间的距离为测量值, 计算的相对距离差的中误差(相对测量精度)为 0.031 109 m。从这些数据可以看出, 在控制点处激光测量点经系统误差改正后的坐标测量精度优于 0.05 m。检查点处激光测量点经系统误差改正后的测量精度结果见表 7。

将式(5)中的 6 个参数 $d\varphi_1$ 、 $d\omega_1$ 、 dK_1 和 dX_{pc} 、 dY_{pc} 、 dZ_{pc} 略去可组成 6 参数标定模型, 6 参数标定模型只能对激光扫描直角坐标系与 POS 坐标系之间的相对空间方位参数进行标定, 而没有考虑 POS 坐标系与大地坐标系间的系统误差。利用 6 参数模型进行标定, 得到的控制点经标定处理后的点位中误差列于表 5 之中。表 5 中的 6 参数标定精度分析与表 4 类似。从表 5 可看出, 经 6 参数标定模型结果计算的控制点处激光测量点

经系统误差改正后的 X 、 Y 、 Z 坐标中误差分别为 0.052 525 m、0.034 311 m 和 0.024 979 m, 其精度稍低于经 12 参数标定模型结果的精度。

表 5 6 参数标定精度

Tab. 5 Precision of 6 parameter calibration m

激光测量点经标定处理后的坐标中误差		
X	Y	Z
0.052 525	0.034 311	0.024 979

为验证标定结果的可靠性, 在车载激光扫描成像试验中同时使用了 8 个球形靶标作为校验点, 通过车载激光扫描成像系统和全站仪测量分别获取球形靶标对应的球面点坐标数据, 然后采用最小二乘拟合方法得到每个球形靶标对应的球心坐标和半径, 其结果如表 6 所示。将二者进行对比分析, 可得到基于球形靶标的激光扫描测量数据的中误差; 同时, 通过对拟合的靶标球心之间的相对距离进行分析, 可求得基于球形靶标的激光扫描测量系统的相对测量精度(见表 7)。

表 6 最小二乘拟合的球形靶标球心坐标和半径

Tab. 6 Least squares fitting central coordinates and radius of spherical targets m

球号	全站仪测量数据拟合结果 (球面点拟合精度: 0.001 4 m)				激光扫描数据拟合结果 (球面点拟合精度: 0.005 2 m)			
	X	Y	Z	R	X	Y	Z	R
1	433 638.049 8	4 420 013.733 8	62.216 9	0.166 6	433 638.023 4	4 420 013.753 0	62.185 7	0.191 9
2	433 642.761 1	4 420 013.827 7	62.164 5	0.160 7	433 642.762 0	4 420 013.882 9	62.207 6	0.207 3
3	433 646.057 9	4 420 013.919 4	62.403 0	0.147 6	433 646.066 4	4 420 013.981 2	62.451 3	0.211 7
4	433 649.502 3	4 420 013.922 0	62.329 7	0.172 8	433 649.519 4	4 420 013.975 0	62.355 1	0.233 1
5	433 655.567 3	4 420 013.947 1	62.169 3	0.162 9	433 655.577 1	4 420 013.981 3	62.156 7	0.203 1
6	433 659.261 9	4 420 013.998 2	62.061 7	0.180 8	433 659.284 0	4 420 014.089 6	62.083 7	0.261 7
7	433 666.957 8	4 420 014.104 0	61.876 1	0.166 5	433 666.976 6	4 420 014.111 9	61.870 1	0.182 6
8	433 670.964 9	4 420 014.038 7	61.375 8	0.134 6	433 670.977 9	4 420 014.055 8	61.400 4	0.170 1

表 7 基于球形靶标的激光扫描测量数据的精度

Tab. 7 Precision of laser imaging data based on spherical targets m

激光测量点经标定处理后的拟合球心坐标中误差				拟合球心距离测量中误差	
X	Y	Z	R	相对精度	
0.016 463 125	0.049 905 344	0.029 773 01	0.050 299 526	0.015 089 562	

表 7 是基于球形标志(检查点)进行的精度分析结果。激光扫描成像系统和全站仪首先均测量足够数据的球形标志表面点, 再利用这些表面点拟合球心的坐标, 以拟合出的球心坐标作为球形标志的位置坐标。同样以全站仪测量数据计算的

球形标志坐标为真值, 计算出检查点处激光测量点经系统误差改正后的 X 、 Y 、 Z 坐标中误差分别为 0.016 463 125 m、0.049 905 344 m 和 0.029 773 01 m; 球半径 R 的拟合中误差为 0.05 m; 球心相对距离测量中误差(相对精度)为

0.015 m。从这些数据可看出,检查点的坐标测量精度优于 0.05 m。

图 2 显示的是户外标定场及球形靶标,图 3 为经过标定结果改正处理后的车载激光扫描成像系统得到的三维激光点云图数据。从图 3 可以看出,三维激光点云图数据具有很强的表现目标细部的能力。



图 2 户外标定场及球形靶标

Fig. 2 Outdoor calibration site and spherical targets



图 3 车载激光扫描成像获取的三维点云图

Fig. 3 3D point cloud data acquired by vehicle laser imaging system

从上述表 4、表 5 的试验结果可以看出,采用 12 参数标定模型的求解精度比 6 参数标定模型的求解精度为高,说明 12 参数标定模型可以更为有效地减少安装误差和时间误差的影响。从表 6、表 7 的结果来看,通过球形靶标的校验可知,本文提出的车载激光成像系统标定模型解算所得的结果精度是可靠的。

5 结论

传感器方位参数的标定是多传感器集成系统中的关键技术问题之一。本文对基于车载 GPS/IMU 激光成像系统的外方位元素的动态标定进行研究和试验,根据 GPS、IMU 及激光扫描仪的特点,设计室外动态检测场和检测标志,提出并实现一种带有微小转角修正的车载激光成像系统外

方位元素动态标定方法。试验结果表明,该标定方法能够较好地进行基于 GPS/IMU/LS 的车载激光成像系统外方位元素的动态标定,从控制点和检查点的测量结果来看,该方法获得较高的标定精度。从 6 参数模型和 12 参数模型的标定结果来看,12 参数模型的标定精度高于 6 参数模型的标定精度,说明 POS 坐标系与大地坐标系之间还存在一定的系统误差,由于 IMU 传感器动态条件下测量精度较高的特性,这种系统误差是需要进行动态标定来改正的。利用动态标定的结果建立 GPS、IMU 和 LS 等传感器之间的空间方位关系,可改正由于传感器的仪器安装误差、时间同步误差等而引入的系统误差,从而使车载 GPS/IMU 激光成像系统能够以直接地理参考定位方式高精度地获取待测目标的空间位置。建立实用的动态标定场、如何更好地判读和测量控制点在激光点云图上的位置等将是需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] INABA K, MANANDHAR D, SHIBASAKI R. Calibration of a Vehicle based Laser/CCD Sensor System for Urban 3D Mapping[EB/OL]. [1999-11-22]. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1999/ts4/ts4147.asp>.
- [2] NAGAI M, SHIBASAKI R, MANANDHAR D. Calibration Methodology for Laser Scanner External Parameters[EB/OL]. [2004-11-22]. http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2004/gen_sensors/acrs2004_a4008pf.htm.
- [3] MANANDHAR D, SHIBASAKI R. Vehicle borne Laser Mapping System (VLMS) for 3D Urban GIS Database[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management. Manoa: University of Hawaii, 2001.
- [4] MANANDHAR D, SHIBASAKI R. Prototype Development for Vehicle based Laser Mapping System (VLMS) [C] // Proceedings of the 19th ISPRS Congress. Amsterdam: ISPRS, 2000: 359-366.
- [5] PLESS R, ZHANG Q L. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder [C] // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Sendai: [s. n.], 2004: 230F-2306.
- [6] LI Maoxi, WANG Congjun, CHEN Xing. Research on Acquired Object's 3D Data Based on One CCD Camera[J]. Automation and Instrumentation, 2005(5): 13-16. (李茂西,王从军,陈鑫.基于单目 CCD 摄影机的三维点云数据重建研究[J].自动化与仪表,2005(5):13-16.)

(下转第 372 页)

- [7] ZHANG Xianfeng, CUI Weihong. Integrating GIS with Cellular Automata to Establish a New Approach for Spatiotemporal Process Simulation and Prediction [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(2): 148-155. (张显峰, 崔伟宏. 集成 GIS 和元胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. 测绘学报, 2001, 30(2): 148-155.)
- [8] MANSON S M. Land Use in the Southern Yucatan Peninsular Region of Mexico: Scenarios of Population and Institutional Change[J]. Computers, Environment, and Urban Systems, 2006, 30(3): 230-253.
- [9] LI Xia, YEH A G O, LIU Xiaoping, et al. Geographical Simulation System: Cellular Automata and Multiagent System[M]. Beijing: Science Press, 2007. (黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体[M]. 北京: 科学出版社, 2007.)
- [10] LI Xia, LIU Xiaoping. Embedding Sustainable Development Strategies in Agent-based Models for Use as a Planning Tool[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(1): 21-45.
- [11] LI Xia, YEH A G O. Modeling Sustainable Urban Development by the Integration of Constrained Cellular Automata and GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(2): 131-152.
- [12] CHEBEANE H, ECHALIER F. Towards the Use of a Multiagents Event Based Design to Improve Reactivity of Production System[J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 37(1-2): 9-13.
- [13] PERMAN R, COMMON M, MCGILVRA Y J, et al. Natural Resource and Environmental Economics[M]. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2002.
- [14] CAI Lin. Modeling and Simulation Research on Artificial Urban Space System[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (蔡琳. 人工城市空间系统建模与仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.)
- [15] XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological Assets Valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-195. (谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-195.)

(责任编辑: 雷秀丽)

收稿日期: 2009-10-21

修回日期: 2010-04-29

第一作者简介: 张鸿辉(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为遥感与地理信息系统应用研究、环境变化模拟研究等。

First author: ZHANG Honghui (1980—), male, PhD candidate, majors in remote sensing geo-analysis, GIS application, environmental changes and modeling.

E-mail: zhhgis@163.com

(上接第 350 页)

- [7] ZHOU Keqin, ZHAO Xu, DING Yanhui. The 3D Visualization's Approach Based on Laser Scanning[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(1): 6-27. (周克勤, 赵煦, 丁延辉. 基于激光点云的 3 维可视化方法[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(1): 6-27.)
- [8] CHEN Yuan, CHEN Zhen, WEI Shuigen. Segmentation Method for Point Cloud Data Based on CCD Image[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Sciences Edition), 2007, 21(1): 40-42. (陈远, 陈震, 危水根. 基于 CCD 图像的点云区域分割方法[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2007, 21(1): 40-42.)
- [9] ZHAN Jinhui, CHEN Zhen, WEI Shuigen. Edge Extraction of Point Data Based on CCD Image[J]. Shanxi Electronic Technology, 2008(3): 3-12. (湛金辉, 陈震, 危水根. 基于 CCD 图像的激光点云数据边界提取法[J]. 山西电子技术, 2008(3): 3-12.)
- [10] KANG Yongwei, ZHONG Ruofei, WU Yu. Research of Calibrating Vehicle Laser Scanner's External Parameters [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(37): 250-253. (康永伟, 钟若飞, 吴侯. 车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J]. 红外与激光工程, 2008(37): 250-253.)
- [11] YE Zetian, LIU Xianlin, ZHONG Ruofei, et al. Study of Vehicle Data Acquisition and Processing System Integrated with Multi-sensors [J]. China Science and Technology Achievements, 2008(12): 46-48. (叶泽田, 刘先林, 钟若飞, 等. 车载多传感器集成快速数据获取与处理系统研究[J]. 中国科技成果, 2008(12): 46-48.)
- [12] WANG Zhizhuo. Principles of Photogrammetry[M]. Wuhan: Publishing House of Wuhan University, 2007: 18-19. (王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 18-19.)

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2010-02-01

修回日期: 2010-06-25

第一作者简介: 叶泽田(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事摄影测量与遥感方面的研究工作。

First author: YE Zetian(1963—), male, PhD, professor, PhD supervisor, majors in photogrammetry and remote sensing.

E-mail: yezt@sina.com