

基于传感器联合测量的车载 POS 精度检测系统设计*

周阳林^{1,2}, 李广云^{1,2}, 王力^{1,2}, 周帅峰³, 宗文鹏^{1,2}, 董明^{1,2}

(1. 信息工程大学导航与空天目标工程学院 郑州 450052; 2. 地理信息工程国家重点实验室 西安 710054;
3. 61206 部队 北京 100000)

摘要: POS 系统是移动测量系统的重要组成部分, 其位置姿态精度一直受到广泛关注。结合全站仪、激光跟踪仪、GNSS 授时装置等传感器, 设计了动态精度检测系统, 开展了 POS 系统动态精度检测方法研究。主要采用单次测量时间统计、平滑曲线拟合等方法探测检测系统的测量误差, 并在误差剔除的基础上, 结合 ICP 算法, 利用跟踪仪高精度测量数据, 对全站仪数据进行修正, 提高检测系统整体测量精度。最后, 在某实验区, 进行车载 POS 系统动态跟踪实验, 分别采用整体轨迹对比和实时点对点对比方法进行 POS 系统事后处理精度检测和实时导航精度检测。实验结果表明: 采用该种检测方法, 动态检测系统能检测出 POS 实时和事后处理的动态定位精度。

关键词: POS 系统; 动态精度检测; ICP 算法; 轨迹修正; 误差分析

中图分类号: TH761 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.60

Design of vehicle-based POS performance evaluation system based on multi-sensors' composite measurements

Zhou Yanglin^{1,2}, Li Guangyun^{1,2}, Wang Li^{1,2}, Zhou Shuaifeng³, Zong Wenpeng^{1,2}, Dong Ming^{1,2}

(1. School of Navigation and Aerospace engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
2. National Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China; 3. 61206 Troops, Beijing 100000, China)

Abstract: position and orientation system (POS) is one of the most important components in mobile mapping system, whose position and orientation accuracy attracts considerable attention. By using total station, laser tracker and GNSS timed device, this paper designed a compound dynamic accuracy testing system. The measurement method of dynamic position accuracy testing for POS is also focused, which utilizes the time statistics of single measurement and curve fitting to calculate the measurement error. After eliminating gross error from the raw observation data, the ICP (iterative closest point) algorithm is used for modifying the trajectory of total-station system. As a result, the dynamic measurement can be enhanced by comparing the high-accuracy trajectory of laser tracking system and the total-station system. Outdoor experiments are carried out to verify the proposed calibration method, in which the overall trajectory comparison and real-time comparison are applied for testing the dynamic position accuracy of POS. Experimental results indicate that the designed evaluation system can be used for testing both real-time and post-processed dynamic position accuracy of POS.

Keywords: position and orientation system (POS); dynamic accuracy testing; iterative closest point (ICP) algorithm; trajectory correction; error analysis

1 引言

位置姿态系统 (position and orientation system, POS) 系统主要是由惯性导航装置 (Inertial Navigation System,

INS)、卫星导航装置 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 和里程计等传感器构成的组合导航系统。在移动测量系统中, 它起着直接地理参考和传感器定向的功能, 实时为载体提供空间位置和姿态信息, 使移动测量系统获取的点云数据、影像数据具有相应的地理坐标^[1]。

POS系统的精度决定了移动测量系统的整体精度水平,因此国内外对提高POS系统的精度开展了广泛的研究,但对检测POS系统动态精度的研究较少,其精度测试主要依赖生产厂商完成,缺乏公开、系统的检测方法。目前,国内外学者多采用移动测量系统整体成图质量分析,或单独分析POS子系统GNSS与INS的工作性能的方式,开展POS系统的动态精度检测研究。

目前,结合传感器测量性能的移动测量系统成图质量分析方法可用于POS系统的动态精度检测。Habib A等人^[2]、Pinto L等人^[3]分别对机载和车载移动测量系统开展整体精度检测研究,通过比对特征点的方式验证POS系统的位置姿态精度。但采用此类方法开展POS动态精度检测时,传感器测量误差,传感器与POS之间安置误差及传感器之间数据时间同步误差都会对POS系统精度分析造成一定的影响^[4]。此外,该方法对检测环境要求较高,需设置明显的特征点,检测过程较为复杂^[5-6]。

国内外对GNSS动态精度评定方法开展了较多的研究。Taylor教授^[7]在已知坐标的铁轨上开展了GNSS动态定位精度评定研究;许其凤院士结合数字摄影测量技术建立了国内首个GNSS动态精度鉴定标准^[8-9];郑勇教授^[10]结合光电传感器,采用标准圆轨迹比对的方式对GNSS动态精度进行鉴定。若将此类方法直接用于POS系统动态精度评定,会出现部分问题:1)POS系统中心无法直接观测,无法直接进行动态测量;2)采用标准轨道对环境的依赖性较大,成本较高,整体适用性较低。

为更直接分析POS系统的动态定位精度,本文采取在载体上布设测量合作目标的方式,在确定其与POS中心位置关系的基础上,通过对合作目标进行跟踪测量的方式评定POS系统的定位精度。实验过程中,使用了加拿大Applanix公司的POS LV220系统。该系统采用惯性辅助实时动态定位技术(inertially aided real-time kinematic, IARTK),差分卫星定位技术(differential global positioning system, DGPS)和事后数据处理技术(post-processing, PP)进行导航定位,其实时导航定位精度最高可达到厘米级。

2 联合测量方案设计

目前,常用的动态测量方法有流体静力水准测量、标准轨迹测量、数字摄影测量、全站仪动态测量^[11]以及激光跟踪仪跟踪测量^[12]、RTK测量^[13]、惯性测量^[14]等,这些检测方法的检测精度从微米到几十米不等,适用的测量环境、范围和速度也有所不同。

但直接使用常规测量装置及其测量方案开展车载POS系统动态定位精度检测研究均存在一定的问题:流体静力水准测量主要用于建筑变形与倾斜检测,无法用于POS系统动态精度检测;标准轨道测量和摄影测量对

实验场地空间及标识布设有较高要求,受测量环境限制大,且测量流程复杂;全站仪静态测量精度较高,但动态测量时,受测量方法限制,精度相对较低,不能满足POS系统动态精度检测需求;激光跟踪仪动态测量精度高,但测量范围有限,且无法直接实现地理参考,无法直接用于POS系统动态精度检测;RTK测量与惯性测量动态定位精度较低,无法用于POS系统动态精度检测。

因此,本文采用多传感器组合测量的方式开展野外POS系统精度检测研究。考虑复杂野外测量环境、高精度动态测量等条件,本文首次设计了全站仪、激光跟踪仪联合测量方案:以全站仪的测量信息为主,采用激光跟踪仪测量数据作为辅助信息,用于验证和修正全站仪测量的测量数据,提高检测系统的整体测量精度。同时,通过全站仪的测量信号与GNSS秒脉冲信号时间同步,实现检测系统的实时动态测量功能。

测量方案所涉及的关键技术及其解决方案如下。

1)精确时间基准。本文采用天文授时系统对动态检测进行授时^[10],以计算机时为中介,将GPS时与全站仪时进行时间同步。数据时间同步精度可达到微秒级,满足动态精度检测要求。

2)精确坐标基准。在室外环境下,通过测量合理布置公共点,实现了多传感器坐标基准统一,其坐标转换精度均能达到亚毫米级,满足精度检测要求^[15]。

3)高精度动态测量。将全站仪与跟踪仪进行联合测量,全站仪用于辅助跟踪仪实现直接地理参考,跟踪仪用于消除全站仪测量误差,检测系统的整体测量精度与测量范围得到较大提高。

3 动态精度检测系统设计

本文采用组合测量方案,结合GNSS授时装置、全站仪、激光跟踪仪等传感器,设计了一套动态检测系统。动态检测主要由授时装置,跟踪测量装置、控制装置、测量合作目标、数据传输链路及供电电源6部分组成。动态检测系统集成效果如图1所示。

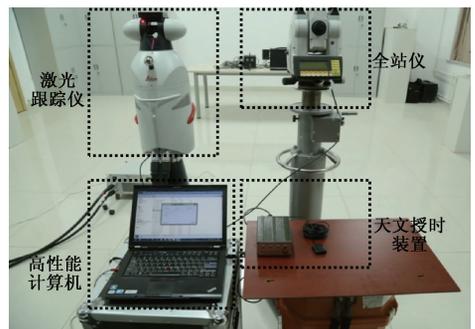


图1 动态检测系统

Fig. 1 Composition of dynamic testing system

1) 跟踪测量装置:激光跟踪仪采用脉冲法测距,采用位置敏感器技术(phase sensitive detector, PSD)^[16],采样频率高,动态跟踪测量精度高,坐标测量精度为亚毫米级。但跟踪仪的测量范围有限,测量半径仅为80 m。本文采用的AT901-B跟踪仪无对中接口,在野外不能直接实现地理参考,因此需要其他测量装置的辅助来实现地理参考;全站仪采用相位法测距,使用目标自动识别技术(auto target recognition, ATR)^[16],采样频率较低,动态跟踪测量误差随距离增大而累积,最高可达到厘米的量级。但全站仪测量范围较大,可达到1 km。

2) 数据传输链路:为减少信息传输之间的干扰,本文设计的系统中,分别采用串口通信及网口通信的方式,完成全站仪与激光跟踪仪的数据传输。

3) 控制装置:采用高性能计算机以满足计算机持续工作,串口通信保持畅通,计算机晶振频率稳定等要求。

4) 授时装置:通过天文授时装置,动态检测系统与POS系统实现时间基准统一。但两套系统的采样频率并不一致,动态检测系统获取测量数据与POS数据的时间信息并不能一一对应。因此,需采用相应插值算法,对POS数据进行插值计算,从而实现测量数据实时精度对比。

5) 测量合作目标:采用CCR角耦合棱镜,在牢固靶座的配合下,适用于高精度的动态测量。

检测系统的工作流程可分为实地操作和内业处理两部分:实地操作,在野外采用天文授时装置对系统进行时间同步,而后根据公共点测量,全站仪辅助激光跟踪仪实现直接地理参考,然后跟踪被检载体并记录相关数据;内业处理,对测量数据进行质量检核,进行测量误差的检测与补偿,对整体数据进行分析以完成车载POS动态定位精度的评定。

4 动态检测系统误差修正

采用本文所设计的检测方案,存在的误差可分为两类:1) 动态检测系统的测量误差,如全站仪的测量误差,激光跟踪仪的测量误差及GNSS接收机的授时误差;2) 数据处理的误差,如坐标转换的误差、时间同步的误差及整体轨迹拟合的误差。

授时系统的授时精度为20 ns,传感器数据同步精度为7.2 μs,但数据传输时存在ms量级的不稳定延时。为减弱时间同步误差对测量的影响,本文采取低速运动状态进行实验。

实验过程中选取了合适的公共点进行坐标转换,并在多余点的基础上对坐标转换精度进行验证,实测坐标基准统一精度为0.34 mm,因此该误差对测量数据处理的影响可忽略。

激光跟踪仪的动态测量误差在亚毫米的量级上,满

足动态测量精度需求。本文将跟踪仪测量数据作为基准数据,通过对全站仪动态测量误差进行分析处理,完成检测系统测量误差修正,以提高检测系统的整体测量精度。

4.1 基于单次测量时间统计的误差剔除

全站仪在跟踪测量的过程中,由于内外光路转换不稳定,测量数据会出现周期性的误差。因此,本文以全站仪单次测量时间为依据,筛选测量不稳定点并进行剔除,以减少全站仪的测量误差。

对全站仪单次测量数据进行统计,可发现:在实验过程中,全站仪平均测量所用时间为0.17 s,测量数据存在周期性跳跃波动,如图2所示。

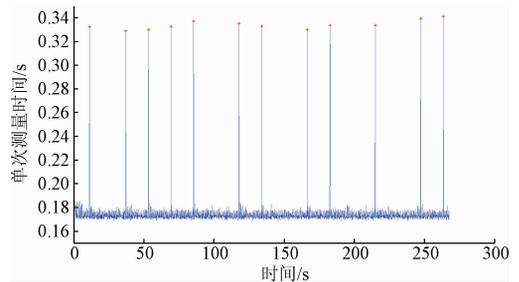


图2 全站仪测量时间统计

Fig. 2 The measurement time statistics of total station

由图2可知,在测量过程中,20 s左右的间隔,会出现测量时间明显增加的点,此时全站仪测量效果较差,获取点的测量数据存在较大的误差。因此,在数据处理过程中,可根据测量时间为条件,对测量效果较差的数据进行剔除。

4.2 基于平滑轨迹的误差剔除

低速情况下,物体运动轨迹是光滑连续的曲线,因此可根据光滑轨迹条件,通过对测量系统的数据进行平滑处理,剔除检测系统的部分测量误差。本文采用3次分段曲线拟合的方式进行整体轨迹拟合,用于全站仪测量数据误差探测。以Z轴方向为例,具体的公式有:

$$z = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

具体使用五点3次拟合法,可将公式化简为:

$$\begin{cases} \bar{z}_{i-2} = \frac{1}{70}(69z_{i-2} + 4z_{i-1} - 6z_i + 4z_{i+1} - z_{i+2}) \\ \bar{z}_{i-1} = \frac{1}{35}(2z_{i-2} + 27z_{i-1} + 12z_i - 8z_{i+1} + 2z_{i+2}) \\ \bar{z}_i = \frac{1}{35}(-3z_{i-2} + 12z_{i-1} + 17z_i + 12z_{i+1} - 3z_{i+2}) \\ \bar{z}_{i+1} = \frac{1}{35}(2z_{i-2} - 8z_{i-1} + 126z_i + 27z_{i+1} + 2z_{i+2}) \\ \bar{z}_{i+2} = \frac{1}{70}(-z_{i-2} + 4z_{i-1} - 6z_i + 4z_{i+1} + 69z_{i+2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:拟合值 \bar{z}_i 即为测量值的坐标估计值,设立阈值 δ_1 ,

若拟合值与测量值的插值 $d = |z_i - z_i|$ 大于阈值 δ_1 , 说明改点的测量值存在误差, 应剔除。本文将高程方向的阈值设置为 5 mm, 进行测量误差剔除。以实测数据为例, 其误差探测的效果如图 3 所示。图中黑色点即为该方法搜索出的所需剔除的测量误差点。

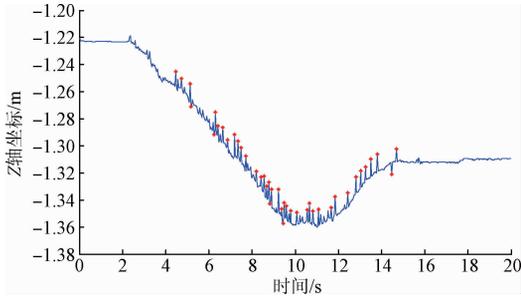


图3 Z轴坐标误差探测图

Fig. 3 Error detection on Z axis

由图 3 可知, 在剔除不稳定的测量点后, 全站仪测量结果仍存在部分误差较大的点, 可根据平滑轨迹的条件, 将该部分测量误差进行剔除。

4.3 基于激光跟踪仪测量数据的误差修正

在平滑轨迹处理的基础上, 本文采用轨迹修正的方法, 对全站仪的测量数据进行修正, 以提高检测系统的动态测量精度。该方法主要是以激光跟踪仪输出测量数据为基础, 将迭代最近点算法 (iterative closest point, ICP)^[17] 用于修正全站仪输出数据。如图 4 所示, ICP 算法是一种收敛算法, 主要用于缩短同名点的距离来实现图像拼接。在数据预处理基础上, ICP 算法以基础数据集为基准, 通过对需要转换的数据集进行坐标旋转和平移, 使两个数据集重合, 实现数据的拼接。

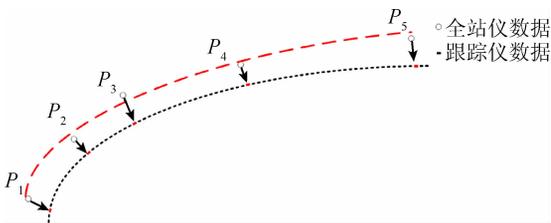


图4 轨迹修正示意图

Fig. 4 Schematic diagram of trajectory correction

误差修正步骤如下:

1) 获取基准轨迹 P 与待修正轨迹 Q 对应的同名点。本文使用 POS 输出轨迹为基准, 其采样频率为 200 Hz, 以点间距离最短为条件, 进行同名点的选取。

$$ds = |p_i - q_i|_{\min} \quad (3)$$

2) 根据邻近的同名点对求取坐标旋转矩阵和坐标平移矩阵 T_1 。在求解时, 给坐标旋转矩阵 R_1 附初值。

$$P = R_1 Q_0 + T_1 \quad (4)$$

3) 将求解所得坐标转换参数用于轨迹 Q 的修正。

$$Q_1 = R_1 Q_0 + T_1 \quad (5)$$

4) 利用下一组相邻同名点对求解标准轨迹 P 与经过修正后轨迹 Q_n 的转换参数, 并将求解所得新的转换参数 R_{n+1}, T_{n+1} 用于 Q_{n+1} 的修正, 获取新的修正轨迹 Q_{n+1} 。主要算法如式 (6)、(7) 所示。

$$P = R_{n+1} Q_n + T_{n+1} \quad (6)$$

$$Q_{n+1} = R_{n+1} Q_n + T_{n+1} \quad (7)$$

5) 设立迭代终止条件: 设定一个迭代收敛阈值 $\delta > 0$, 通过求解并比较修正前后同名点对之间均方根误差 d_n 来判断是否终止修正。当 $d_n - d_{n+1} < \delta$ 时, 表示修正过程结束。

将迭代条件的阈值设置为 5 mm, 对剔除误差的实验数据进行轨迹修正, 修正前后误差对比效果如图 5 所示。

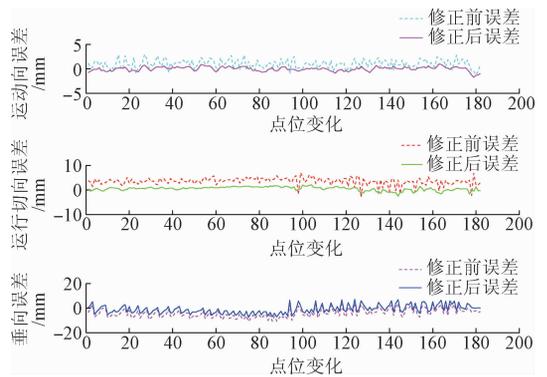


图5 轨迹修正效果对比

Fig. 5 Comparison of trajectory correction

由图 5 可知, 以跟踪仪测量数据为基准, 对全站仪测量数据进行轨迹修正后, 全站仪的动态测量精度明显提高: 载体运动向测量误差从修正前 5.15 mm 降至 0.75 mm, 运动向误差从修正前 2.4 mm 降至 0.8 mm, 垂向误差从 12.7 mm 降至 5.2 mm。对比实验验证了进一步验证了本文使用方案的可行性: 采用全站仪与跟踪仪同时跟踪测量, 最终通过跟踪仪有效测量范围内的高精度测量数据修正全站仪测量数据, 从而实现检测系统的整体精度的提高和测量距离的延长。

5 检测实验结果及分析

实验测区选择为某校园环道, 测区如图 6 所示, 现场操作如图 7 所示。其中白色线路为可行车线路, 总长 1.5 km, 路况良好; 基准站标志为联测的 GNSS 控制点, 有牢固基座, 坐标值已知, 其定位精度在 mm 级; 虚线框

选区域为本次实验所选用的主要路段,包括一条东西向 120 m 直线路段及南北向 200 m 直线路段;车辆行进速度控制在 20 km/h 内;Point A 与 Point B 为实验时动态检测系统架设的已知点。

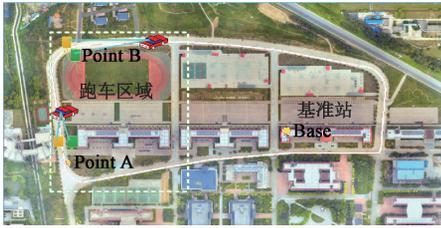


图6 室外试验场地图

Fig. 6 Outdoor experiment field



图7 现场操作

Fig. 7 Outdoor field operation

实验时,POS 输出的频率设置为 200 Hz,激光跟踪仪的频率设置为 1 000 Hz,全站仪的输出频率设置为 17 Hz。在有效测量范围内,激光跟踪仪的坐标测量精度优于 0.495 mm,POS 输出的实时导航精度为水平方向 29.9 cm,垂直方向 30.0 cm,经过 post-processed 处理后输出的轨迹数据内符合精度为水平方向 1.98 cm,垂直方向 4.89 cm。

通过单次测量时间及曲线拟合方法对全站仪测量数据进行误差剔除后,采用以下方法分别对 POS 系统事后处理精度和实时导航精度进行评定。

1) 以跟踪仪测量数据为基准,采用轨迹修正算法对全站仪测量数据修正后,采用整体轨迹的对比的方法将检测系统数据与 POS 后处理测量数据进行对比,所得数据如表 1 所示。

表1 检测系统与 POS 事后处理精度对比

Table 1 Comparison of position accuracy between dynamic testing system and post-processed POS output (mm)

运动方向	北向误差	东向误差	垂向误差
东西向	20.9	2.8	43.6
南北向	2.3	12.7	41.3

2) 结合插值算法,采用实时点位对比的方法将全站仪测量数据与 POS 测量数据进行对比,所得数据如表 2 所示。

表2 检测系统与 POS 实时输出精度对比

Table 2 Comparison of position accuracy between dynamic testing system and real-time POS output (cm)

运动方向	北向误差	东向误差	垂向误差
东西向	20.9	28.2	30.6
南北向	19.1	23.2	27.4

由表 1 的数据可发现,与运动切向相比,载体运动方向的误差明显偏小。这主要是由于采用整体轨迹对比方法时,选取最临近点并不一定是相同时刻测量点而造成的。而表 2 采用实时点位精度对比时,不存在此类情况,其运动向与运动切向误差精度一致,说明采用整体轨迹对比法在运动向进行误差检测时存在一定的局限性。因此,实验过程中分别设计载体车在东西向和南北向运动,综合两组数据轨迹对比数据来评定 POS 动态精度。

2) 将南北向运动与东西向运动测量结果进行综合,由表 1 数据推导可知,采用整体轨迹对比的方法,通过检测系统检测出 POS 水平方向的精度为 24.5 mm,垂直方向为 42.4 mm,与 POS 输出事后处理数据内符合精度一致。

3) 由表 2 数据可知,采用实时点位对比的方法,检测出 POS 实时导航精度水平方向为 32.6 mm,垂直方向为 29.0 mm,与 POS 实时输出导航数据内符合精度一致。

6 结 论

本文首次使用全站仪与激光跟踪仪联合测量的方式开展 POS 系统动态精度评定方法研究并设计了相应的动态检测系统。通过统计测量时间、平滑轨迹处理、整体轨迹修正等误差剔除方法,使动态检测系统的整体测量精度和测量范围都得到较大的提高。

实验时,跟踪段总长约 200 m,载体车平均运动速度为 14.3 km/h。采用本文提出的联合测量方法,检测出 POS 系统实时导航和事后处理精度分别为水平方向 32.6 mm,垂直方向定位精度为 42.4 mm;水平方向 24.5 mm,垂直方向定位精度为 42.4 mm。检测结果与 POS 实时导航和事后处理结果内符合精度一致,说明了 POS LV220 系统的可靠性。本文设计的检测系统及检测方案可为测绘用户提供检核 POS 精度的参考与依据。

本文设计的检测方案及检测方法,适用于野外环境,无已知标准轨迹情况下,进行POS动态精度检测。由于实验条件限制,仅对接收GPS、GLONASS和GALIEO卫星信号为主的POS系统精度检测。今后可结合以北斗卫星导航系统为主的国产组合导航设备和移动测量系统开展精度检测研究,为高精度测绘仪器国产化提供服务。

目前,本文对POS系统动态定位精度检测开展研究,下一步将采用高精度轨道,建立动态检测场,开展POS动态姿态精度检测研究。同时,延长检测时间,在不同测量条件下开展POS系统故障率检测研究。

参考文献

- [1] CRAMER M, STALLMANN D, HAALA N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B3): 198-205.
- [2] HABIB A, KERSTING A P, BANG K. Comparative analysis of different approaches for the incorporation of position and orientation information in integrated sensor orientation procedures [C]. *Proceedings of Canadian Geomatics Conference and ISPRS Commission I Symposium*, 2010:15 - 18 .
- [3] PINTO L, FORLANI G, LII W. A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 34(B3): 210-213.
- [4] 袁修孝. 一种补偿POS定位测姿系统误差的新方法[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(8): 925-934.
YUAN X X. A new method applied for compensating the orientation error of POS [J]. *Progress in Nature Science*, 2008, 18(8): 925-934.
- [5] 曲直. 机载POS单机检校技术研究 with 实验分析[D]. 山东: 山东科技大学, 2011.
QU ZH. Research and experimental analysis on calibration of the airborne POS [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [6] CHAN T O, LICHTI D D, GLENNIE C L. Multi-feature based boresight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013, 82(7): 112-124.
- [7] TAYLOR R K, SCHROCK M D, BLOOMFIELD J, et al. Dynamic testing of GPS receivers [J]. *Transactions-American Society Of Agricultural Engineers*, 2004, 47(4): 1017-1028.
- [8] 孟凡玉. GPS接收机综合检定场的建立及其动态检定方法的实现[D]. 郑州: 信息工程大学, 2002.
MENG F Y. The foundation of comprehensive inspection places with GPS receiver and the realization of dynamic evaluation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2002.
- [9] 李军正. 动态GPS定位检定方法及误差分析[D]. 郑州: 信息工程大学, 2004.
LI J ZH. The method of precision evaluation in dynamic GNSS and error analysis [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004.
- [10] 何峰. 精密动态测量精度检测技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2007.
HE F. A study of precise inspection technology for dynamic surveying precision [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007.
- [11] 李君桥, 汤俊, 傅家亮, 等. 全站仪双站动态测量技术及其应用[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 10: 2343-2348.
LI J Q, TANG J, FU J L, et al. Dynamic measurement technology based on dual electronic total stations and its application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(10): 2343-2348.
- [12] 骆亚波, 郑勇, 夏治国, 等. 大射电望远镜馈源系统50 m模型外界激励响应的检测及分析[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(S1): 374-378
LUO Y B, ZHENG Y, XIA ZH G, et al. Inspection and analysis of the kinematic responses for disturbance of the cable-suspend-feed system in 50-meter-scaled-model of FAST [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(S1): 374-378.
- [13] 林嘉睿, 郝继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2): 463-468.
LIN J R, ZHU J G, ZHANG H L, et al. Field evaluation of laser tracker angle measurement error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 463-468.
- [14] 于永军, 徐锦法, 张梁, 等. 惯导/双目视觉位姿估计算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10): 2170-2176.
YU Y J, XU J F, ZHANG L, et al. Research on SINS/binocular vision integrated position and attitude estimation algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10): 2170-2176.
- [15] 李广云, 李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.
LI G Y, LI Z CH. Principles and applications of the industrial measuring system [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011.

- [16] 范百兴. 基于激光跟踪仪的空间坐标精密测量技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2014.
FAN B X. Research and realization of the high precision coordinate measurement technique using laser tracker [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2014.
- [17] BESL P J, MCKAY N D. Method for registration of 3-D shapes[J]. Robotics - DL tentative. International Society for Optics and Photonics, 1992,14(3):239-256.

作者简介



周阳林,分别在2012年和2015年于解放军信息工程大学获得学士学位和硕士学位,现为解放军信息工程大学博士研究生,主要研究方向为多源融合导航定位技术与高精度导航系统精度评估。

E-mail:zhouyanglin@126.com

Zhou Yanglin received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Information Engineering University in 2012 and 2015,

respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Information Engineering University. His main research interests include multi-sensor integrated navigation technology and performance evaluation of high- accuracy navigation system.



李广云,1987年于郑州测绘学院获得工学硕士学位,现为解放军信息工程大学导航与空天目标工程学院教授、博导,主要研究方向为精密工程与工业测量、导航应用及导航定位与位置服务。

E-mail:guangyun_li@163.com

Li Guangyun received his M. Sc. degree of engineering in 1987 from Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping. Currently, he works in School of Navigation and Aerospace Engineering Information Engineering University as a professor and doctoral supervisor. His main research interests include precise engineering and industry measurement, navigation and location services and applications.