



冬奥会国家速滑馆超大地坪平整度快速测量

李清泉, 吕世望, 陈智鹏, 殷煜, 张德津

引用本文:

李清泉, 吕世望, 陈智鹏, 殷煜, 张德津. 冬奥会国家速滑馆超大地坪平整度快速测量[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(3): 325–333.

LI Qingquan, LÜ Shiwang, CHEN Zhipeng, YIN Yu, ZHANG Dejin. Rapid Measurement of Flatness of Oversized Floor of Speed Skating Oval in Winter Olympic Games[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(3): 325–333.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

云-端协同的智能手机行人室内外无缝定位技术及其原型系统验证

Pedestrian Indoor and Outdoor Seamless Positioning Technology and Prototype System Based on Cloud-End Collaboration of Smartphone
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1808–1818 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210310>

融合多棱镜式雷达/IMU/RTK的轨道车辆高精度实时定位与建图

Real Time Localization and Mapping Integrating Multiple Prism LiDARs/IMU/RTK on Railway Locomotive
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1802–1807 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210478>

一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的网络RTK方法

A Network RTK Method for Large-Scale Satellite Navigation and Positioning Reference Stations
武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1609–1619 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210202>

融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1598–1608 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210113>

利用自适应水准网动态平差建立山东垂直运动速度模型

Vertical Movement in Shandong Province Based on Adaptively Dynamic Adjustment for Level Network
武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 620–625 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180296>



冬奥会国家速滑馆超大地坪平整度快速测量

李清泉^{1,2} 吕世望^{1,2} 陈智鹏^{1,3} 殷煜^{1,2} 张德津^{1,3}

1 深圳大学广东省城市空间信息工程重点实验室, 广东 深圳, 518061

2 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳, 518061

3 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东 深圳, 518061

摘要:施工期平整度测量对地坪施工质量的控制与评估具有重要意义。采用靠尺或水准仪的传统地坪平整度测量方法存在测点稀疏、效率低等不足,难以适应超大地坪施工期平整度快速、精细的测量需求。提出了一种全站仪与惯性导航系统(inertial navigation system, INS)融合的平整度快速测量方法,通过卡尔曼滤波融合全站仪和INS数据,解算小车运动轨迹,根据轨迹点的高程计算平整度指标,发明研制相应的测量设备,应用于2022年北京冬奥会国家速滑馆冰面混凝土基底施工期平整度检测。实验结果表明,所提方法精度与水准仪相当,而测量效率显著提高,不仅能对地坪施工期整体平整度质量进行评估,而且可以对平整度异常进行检测和定位,为地坪的磨平工作提供指导,具有良好的工程价值。

关键词:地坪平整度;全站仪;惯性导航系统;卡尔曼滤波融合;快速测量;工程测量

中图分类号: P258

文献标志码: A

地坪平整度是指地坪任意一定大小的区域内表面高差的程度^[1],是评价水泥地面施工质量的重要指标。在施工过程中,水泥地坪表面的平整度信息不仅影响地坪的外观,而且关系到地坪在完全凝固之后的功能性。在施工期进行平整度测量可以及时评估施工质量情况,辅助指导地坪施工,更好地保证工程质量,相比于建设完成后再进行检测,可以节约更多的时间和物力成本。随着大型仓库、大型运动场馆的建设,室内水泥地坪的面积越来越大,对平整度测量的精度和效率需求也越来越高,如新建的北京冬奥会国家速滑馆,单块现场浇筑的水泥地坪面积达到了数千平方米,地面平整度需求达到了任意5 m区域内高差在 ± 3 mm之内,相对高程测量精度要求达到了 ± 0.5 mm/5 m。因此,对超大室内地坪平整度的测量技术提出了新的要求。

地面平整度测量方法可分为接触式与非接触式两类。接触式测量方法是指仪器通过直接接触地面采集相关数据,包括靠尺法、水准仪法、轮廓仪法等。靠尺法使用塞尺测量直尺与地面之间的缝隙宽度^[2],不足之处在于重复性差,精度与速度不高,只能抽样测量^[3]。水准仪法通过水

准仪和水准尺测量地面点的高程,成本较低,步骤简单,易于实施^[4],但自动化程度低,测量速度只有大约45 m/h,不适合在面积超大的地坪上进行平整度的测量^[5]。为了提高地面平整度测量方法的科学性,美国材料与实验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)推出针对地面形状测量的行业标准ASTM E1155^[6-7],提出了一种基于轮廓仪的定量测量方法。轮廓仪是一种底部有两只支脚的测量仪器,工作时沿规划路线行走,通过倾角计测量仪器的水平角,由于支脚之间的距离是已知的,可以通过计算支脚间的高程差来测量地面高差,并使用 F 数值标准算法根据高程差的平均值和标准差计算相应指标,具有科学性好、重复性高、自动化程度高等优点^[8],但它只能评估地坪的整体平整度,无法得知地坪上任意位置的局部平整度。

非接触式测量方法是指仪器通过图像、激光等方式进行测量,包括图像处理^[9-10]、摄影测量、三维激光扫描、多种传感器融合等。摄影测量法使用相机从不同的视角拍摄目标,解算出目标点的三维坐标,具有较高的精度,均方根(root mean square, RMS)达到了高程0.12 mm,平面坐标

收稿日期: 2021-09-16

项目资助: 国家自然科学基金(41901412); 国家自然科学基金高铁联合项目(N2019G012)。

第一作者: 李清泉, 博士, 教授, 主要从事动态精密工程测量研究。liqq@szu.edu.cn

通讯作者: 陈智鹏, 博士。chenzp1990@szu.edu.cn

0.13 mm^[11],然而需要在地面上设置标记点,该步骤对于超大地坪来说非常耗时,且不能测量标记点之外区域的平整度。激光扫描仪是密集且准确地测量三维形状的通用仪器,已有对于现浇地面和预制构件的平整度质量评估方法^[12],并且可以与建筑信息模型(building information modeling, BIM)进行融合^[13],具有精度高、数据量大等优点,但由于距离越远点云越稀疏,远距离处的点云密度不能达到平整度质量检测的最低要求,从而限制了测量范围,有效测量最远处距离扫描仪仅10~20 m^[14],因此更符合小面积场地和房间的需求。虽然多站扫描可以实现对超大地坪的大面积全面扫描,但频繁搬站会耗费大量时间成本,测量效率大打折扣,不适合用于超大地坪的平整度测量。一些相关专利采用了多种传感器融合的方法进行地面平整度的测量,例如一种基于激光测距仪和倾角传感器的平整度测量方法,辅以全站仪进行平面坐标的测量,从而可以绘制出地面平整度地图,将不达标的位置进行标注^[15],然而该方法使用了轮式移动测量装置,不适用于地坪施工期平整度测量,因为橡胶轮会在未完全凝固的施工期地坪上留下车辙痕迹;Kangas的专利将混凝土振动抹平机和位移、速度和角度等多种传感器结合,用于对未固化的混凝土表面平整度质量进行分析和评估^[16],然而该专利使用了机械吊臂支持和驱动振动抹平机和多个传感器,测量面积受限于吊臂长度,不适合超大地坪平整度测量。

可见,现有的测量方法难以完全适应超大地坪施工期平整度测量的诸多需求。本文针对现有地面平整度测量方法存在的问题,提出了一种基于全站仪与惯性导航系统(inertial navigation system, INS)的平整度测量方法,将INS沿测量路线移动并使用全站仪对INS进行跟踪测量,在使用INS对超大地坪的地面形状进行精密测量的同时使用全站仪观测INS的三维坐标,通过卡尔曼滤波融合两者的数据,解算出地坪的平整度。根据提出的测量方法研制了相应的拖板式平整度测量装备,并在2022年北京冬奥会国家速滑馆的室内冰面混凝土基底进行了装备精度验证实验和方法应用实验。实验结果表明,该方法能够在对初凝水泥地坪的形状影响很小的条件下,获取室内地坪具体位置的局部平整度,不仅确保测量精度与水准仪基本一致,而且大幅度提高了测量效率。

1 超大地坪施工期平整度测量方法

1.1 全站仪/INS组合的平整度测量原理

平整度与一定大小区域内的高差有关,本文将平整度定义为一定长度线形内所有点的高程相对于局部平均高程的最大起伏,因此需要对路线的剖面线形状进行高精度测量。INS具有采样频率高、无需收发信号等优点^[17],将其与地面刚性接触关联并沿测量路线移动,即可采集大量高精度的地面形状相关的数据,即加速度与角速度,从而计算地面的高程和平整度,实现对路线的形状测量。由于INS的漂移误差导致精度随时间降低^[18],因此需要融合其他辅助信息来修正时间累积误差,目前主流方法是使用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)与INS组合系统。在室内场景中,GNSS信号很弱以至于不可用,因此本文提出使用带有跟踪测量功能的TS60全站仪代替GNSS,以5 Hz的频率连续测量与INS刚性连接的棱镜获取载体的位置,使用载体位置三维坐标反馈校正INS。由此,本文提出了基于全站仪/INS组合的平整度测量方法并研制相应的拖拽式平整度测量设备,利用INS采集惯性数据,全站仪测量设备的三维坐标,惯性数据和三维坐标融合解算出测量路线上各轨迹点的位置、速度和姿态角等信息。

基于全站仪/INS的平整度测量方法的技术原理如图1所示,分为数据采集、轨迹解算、平整度计算3大部分。在数据采集阶段,将INS与地面接触,沿测量路线移动,采集角速度与加速度,使用全站仪观测获取载体的三维坐标;使用卡尔曼滤波和RTS平滑(Rauch-Tung-Striebel smoother)融合INS与全站仪数据,解算得到测量路线轨迹点的位置、速度、姿态角数据;根据速度和姿态角计算里程-高程曲线,计算平整度指标,提取平整度超限点的平面坐标,指导超限点磨平工作。

1.2 拖板式平整度测量装备

施工期地坪处于初凝阶段,仍具有一定的流动性,因此INS载体对地面的压强不应过大,避免导致未完全凝固的水泥地坪产生明显形变。同时,载体应搭载全站仪配套棱镜,从而配合全站仪记录自身的三维坐标。由此,本文设计了一种拖板式惯性测量小车,采用拖板作为与地面接触的部件,从而减小压强,并且与棱镜刚性连接,满足了测量方法的需求。

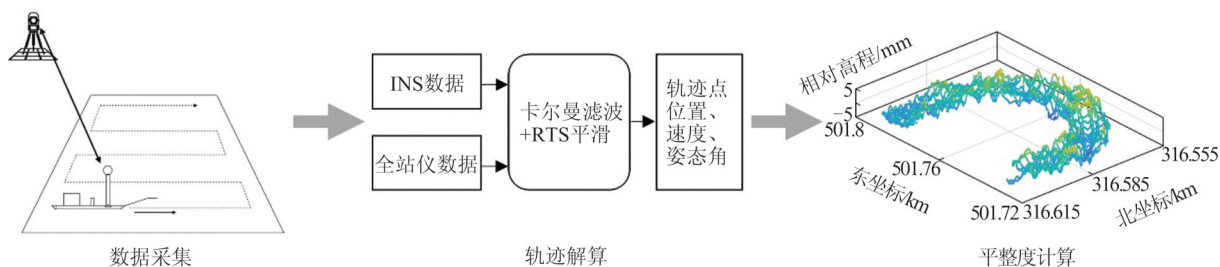


图1 基于全站仪/INS组合的平整度测量原理图

Fig.1 Diagram of Flatness Measurement Based on Total Station and INS

本文设计和研发的拖板式惯性测量小车的结构如图2所示。其主要组成部分包括底板、主控电路模块、惯性测量模块、电源模块和棱镜。小车的核心部分为惯性测量模块,用于移动时采集加速度与角速度数据,并将数据发送至主控电路模块。主控电路模块控制惯性测量模块数据的采集、存储与传输。承载拖板包含底板和翘曲面,用于减小压强和摩擦力。安装于钢管之上的棱镜反射全站仪发出的激光,配合全站仪记录自身的实时三维坐标。

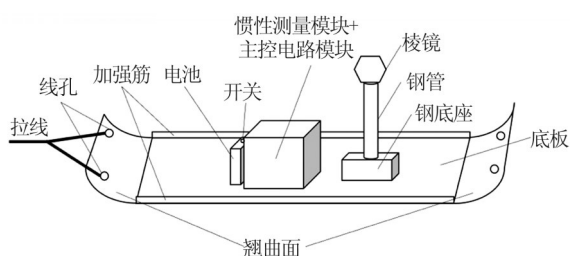


图2 拖板式惯性测量小车结构图

Fig.2 Diagram of Sled with Inertial Navigation Module

惯性测量小车搭载了陀螺零偏 $0.01^\circ/\text{h}$ 、加速度计零偏 $50\mu\text{g}$ 的高精度INS,从而实现地面高差的高精度测量。高程测量精度主要受俯仰角

测量精度影响,以长度180 m的测量路线为例,取最慢运行速度1 m/s,其俯仰角测量误差 $\delta\theta$ 为:

$$\delta\theta = \frac{b_a}{g} + b_g \frac{l}{v} \approx 0.0034^\circ \quad (1)$$

式中, b_g 为陀螺零偏; b_a 为加表零偏; g 为重力加速度; l 为测量路线长度; v 为运行速度。每个测量路线断面上的俯仰角误差为 0.0034° , 对应的相对高差误差约为 $0.296 \text{ mm}/5 \text{ m}$, 满足超大室内地坪平整度的测量需求。

1.3 平整度计算方法

平整度计算分为3个步骤:(1)测量小车轨迹解算;(2)里程-高程曲线计算;(3)平整度指标计算。首先,利用全站仪与惯性测量单元数据解算出小车的轨迹,融合方法如图3所示。对惯性测量单元获取的角速度与加速度进行惯性递推,得到测量路线上各轨迹点的速度、位移和姿态角;以卡尔曼滤波为框架,利用全站仪观测所得的载体三维坐标 r_{TS}^n 对惯性递推进行反馈和改正^[19],纠正惯导误差,得到测量路线上各轨迹点的位置、姿态角、速度以及滤波中间信息;通过RTS平滑算法对滤波结果进行平滑优化^[20],得到测量路线上各点最优估计的位置、姿态角、速度。

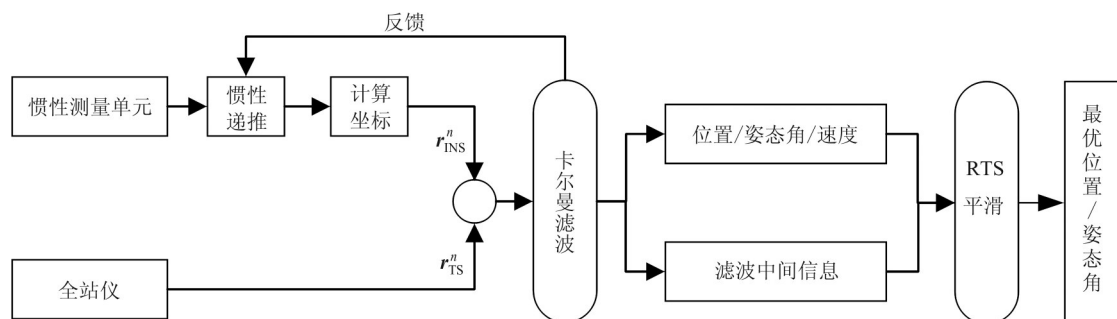


图3 基于卡尔曼滤波的数据融合方法

Fig.3 Data Fusion Method Based on Kalman Filter

通过卡尔曼滤波进行数据融合,首先设计惯导系统的状态向量 X :

$$X = [\varphi \quad \delta v^n \quad \delta r_{\text{INS}}^n \quad b_g \quad b_a]^T \quad (2)$$

式中, φ 、 δv^n 、 δr_{INS}^n 、 b_g 、 b_a 分别为INS的姿态角误

差向量、速度误差向量、位置误差向量、陀螺仪漂移误差向量和加速度计误差向量。通过INS位置推算的棱镜三维坐标 \hat{r}_{MI}^n 的计算公式为:

$$\hat{r}_{\text{MI}}^n = r_{\text{INS}}^n + C_{\text{INS}}^n l_{\text{INS}}^{\text{MI}} \quad (3)$$

式中, r_{INS}^n 是 INS 中心在外部大地坐标系中的位置; $l_{\text{INS}}^{\text{MI}}$ 是棱镜相对于 INS 中心的三维平移分量; C_{INS}^n 是 INS 自身坐标系相对于外部大地坐标系的旋转矩阵。全站仪观测的棱镜三维坐标 \tilde{r}_{MI}^n 为:

$$\tilde{r}_{\text{MI}}^n = r_{\text{TS}}^n + \epsilon_{\text{TS}} \quad (4)$$

式中, ϵ_{TS} 为全站仪观测的点位误差。选取 INS 计算的棱镜位置与全站仪观测的棱镜位置的差值 Z 作为测量值:

$$Z = \hat{r}_{\text{MI}}^n - \tilde{r}_{\text{MI}}^n \quad (5)$$

由此建立方程组并线性化, 形成卡尔曼滤波方程。通过前向卡尔曼滤波、后向 RTS 平滑可以计算得到最优融合轨迹。根据计算的轨迹可以进一步计算测量路线的里程-高程曲线。设测量路线起始点的里程为 0, 根据轨迹点的速度 v 和姿态中的俯仰角 θ , 以及惯性测量模块的采样时间 Δt 递推各点沿测量路线到起始点的里程 d 和高程 h , 计算公式为:

$$\begin{bmatrix} d \\ h \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} d \\ h \end{bmatrix}_k + v_k \Delta t \begin{bmatrix} 1 \\ \sin \theta_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

如图 4 所示, 对于重采样后的测量路线上的任一点 P_i , 以该点为中点在里程-高程曲线上截取长度为 $L = 5 \text{ m}$ 的局部窗口, 即在该点前后距离该点 $L/2$ 的两点处截断, 截取两点中间的局部里程-高程曲线; 计算局部窗口内所有点的最大高程 H_{max} 、最小高程 H_{min} 和平均高程 H_{mean} 之间的差值, 得到最大凸起 H_{up} 与最大凹陷 H_{down} , 其意义为局部窗口内轨迹点高程相对于窗口平均高程的最大起伏程度。取 H_{up} 和 H_{down} 绝对值最大的值作为中心点 P_i 处的平整度指标 F_i , 计算公式为:

$$F_i = \begin{cases} H_{\text{max}} - H_{\text{mean}}, & |H_{\text{up}}| \geq |H_{\text{down}}| \\ H_{\text{min}} - H_{\text{mean}}, & |H_{\text{up}}| < |H_{\text{down}}| \end{cases} \quad (7)$$

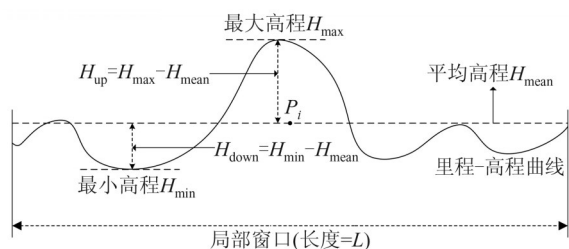


图 4 平整度指标计算方法

Fig.4 Computation Method for Flatness Indicator in Altitude

2 冬奥会速滑馆超大地坪平整度快速测量实验与分析

使用前述平整度测量与计算方法, 分别开展

装备精度验证实验和工程应用, 以验证本文方法的有效性并评价其精度和效率。两个实验的地点均位于北京国家速滑馆的室内冰面混凝土基底, 其平整度需求为全场每 5 m 区域内高程起伏不大于 $\pm 3 \text{ mm}$, 测量时间是混凝土基底在灌注、磨平之后和盖保护布之前的静置初凝状态时。使用人力驱动如图 5(a) 所示的拖板式惯性测量小车在初凝的混凝土基底地面上移动, 现场的仪器设置方式如图 5(b) 所示。为了避免棱镜失锁导致用于反馈校正 INS 测量值的载体三维坐标缺失, 实验时将 TS60 全站仪架设于看台上, 使用坐标已知的控制点进行设站, 如图 5(c) 所示。

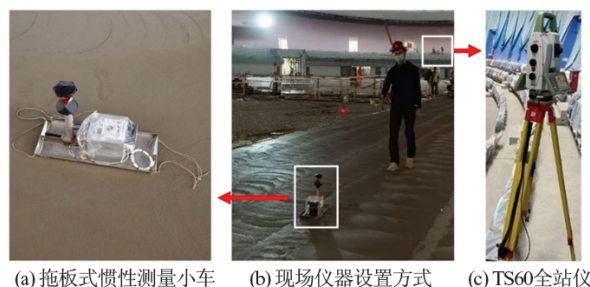


图 5 拖板式惯性测量小车与全站仪的设置方式

Fig.5 Setting Method of Human-Powered Inertial Measurement Sled and Total Station

2.1 测量内符合精度分析

在北京国家速滑馆冰面混凝土基底上选取一块 $4 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的矩形实验场地进行装备精度验证实验, 测量路线如图 6 所示, 将起点设为原点并在图 6 中用红圈标注出来。去掉曲线两端的拐弯处, 规划西侧、中部、东侧 3 条南北走向的测量路线, 长度均为 30 m 左右, 范围在图 6 中以橙色方框标出, 每条路线进行 3 次重复测量。将起始点的坐标和高程均设为 0, 建立东-北-天坐标系。计算西侧、中部、东侧 3 条路线对应的里程-相对高程曲线, 如图 7 所示。图 7 中曲线里程长度均为 30 m, 采样点个数均为 300 个。从图 7 中可以看出, 相同路线多次测量的相对高程具有较好的重复性。

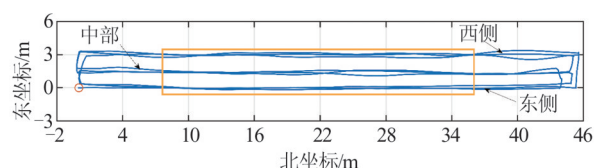


图 6 精度测试实验路线图

Fig.6 Route of Precision Test

对上面 3 条测量路线的相对高程数据进行统计分析。对于每条测量路线, 分别计算三次测量

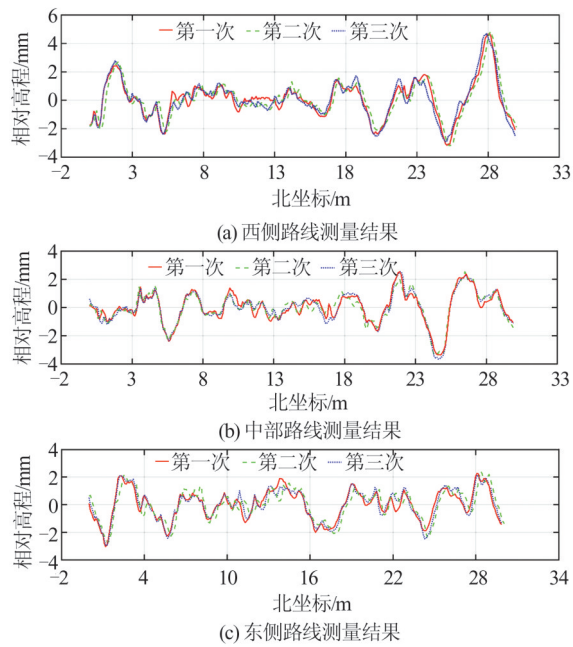


图7 西侧、中部、东侧路线三次相对高程测量结果
Fig.7 Results of Relative Altitude Measurement in West/Middle/East Route

结果两两之间的相关系数和相同位置的高程差值 ϵ ,将相关系数 ρ 、差值的最大值 ϵ_{\max} 列出,如表1所示。由表1可知,对于相同的长度为30 m的路线,不同次测量结果的相关系数均大于0.89,相同位置不同次高程测量结果最大相差不超过2 mm,表明相对高程的测量值具有较高的内符合精度,相对精度达到了2 mm/30 m或1/15 000,验证了本文方法的精确性。

2.2 施工期现场实验结果分析

在北京国家速滑馆冰面混凝土基底上选取

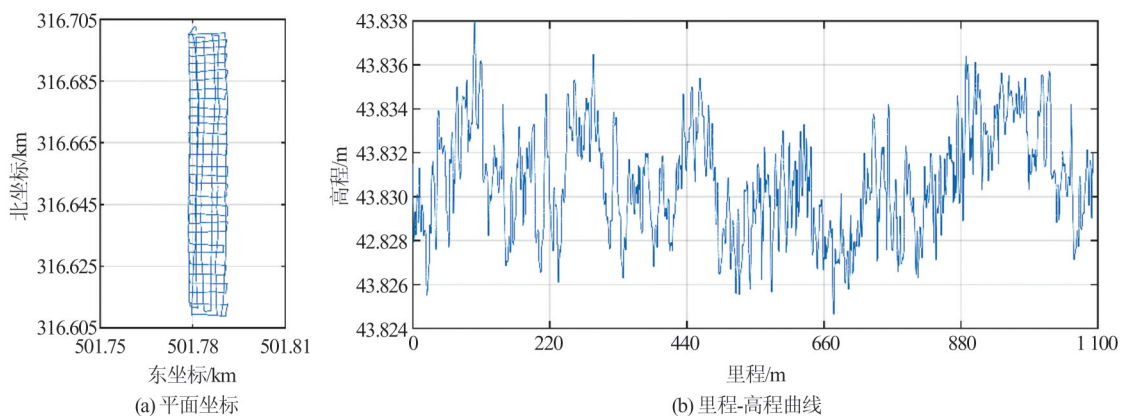


图8 轨迹点平面坐标与里程-高程曲线

Fig.8 Plane Coordinates of Trajectory Dots and Mileage-Altitude Graph

利用轨迹点的里程-高程曲线计算平整度指标,其中起始处、结束处和转弯处不进行计算。通过里程与平面坐标的对应关系,绘制出轨迹点的平面坐标-平整度指标三维地图,如图9(a)所

一段矩形区域进行平整度快速测量方法应用实验,采集角速度、加速度和三维坐标等数据,解算轨迹点的位置、速度、姿态数据,获取里程-高程曲线并计算平整度指标,提取出平整度超限的位置,并对测量精度和效率进行分析。

表1 相对高程重复测量统计信息

Tab.1 Statistics of Repeated Measurement of Relative Altitude

路线区域	测量序号	相关系数 ρ	$\epsilon_{\max}/\text{mm}$
西侧	1 & 2	0.926 5	1.964
	1 & 3	0.962 9	1.211
	2 & 3	0.913 4	1.490
中部	1 & 2	0.951 7	0.775
	1 & 3	0.970 6	1.064
	2 & 3	0.957 2	1.018
东侧	1 & 2	0.895 0	1.591
	1 & 3	0.959 5	0.766
	2 & 3	0.937 8	1.103

对惯性测量模块采集的加速度、角速度数据和全站仪观测的三维坐标进行卡尔曼滤波和RTS平滑,得到轨迹点的位置、速度、姿态数据,递推可得里程-高程曲线。轨迹点的平面坐标(即测量路线图)和里程-高程曲线如图8所示。实地数据采集时,一次测量可以在40 min内将长度约1 000 m测量路线的平整度相关信息采集完毕,覆盖面积约900 m²,测量速度约为1 500 m/h,相较于测量速度仅为45 m/h的水准仪法,效率显著提升。

示。根据施工方的实际需求将平整度指标按绝对值大小分为4个等级: $|F| \leq 3 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} < |F| \leq 4 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm} < |F| \leq 5 \text{ mm}$ 、 $|F| > 5 \text{ mm}$,分别对应合格、轻微超限、中度超限、严重超限,后三者均

表示不合格,在图9(a)中用颜色表示平整度值,4个等级的平整度指标分别用绿、黄、红、品红4色表示。由图9(a)可知,该地坪绝大多数测量点的平整度指标合格,无严重超限区域,但仍存在多处轻微超限区域和一处中度超限区域,其位置如图9(a)中箭头所指位置。经计算,该区域测量点平整度合格率达到了95.59%。截取图9(a)中平

整度指标为“不合格”的区段,将这些区段的中点平面坐标作为平整度超限区域的中心位置,提取中心位置的坐标及平整度指标 F 值,部分提取结果如表2所示。由表2可知目标地坪平整度不合格位置的精确坐标及其不平整程度,从而为施工方下一步的磨平工作提供了明确的方向,即在哪里进行磨平,以及进行何种程度的磨平。

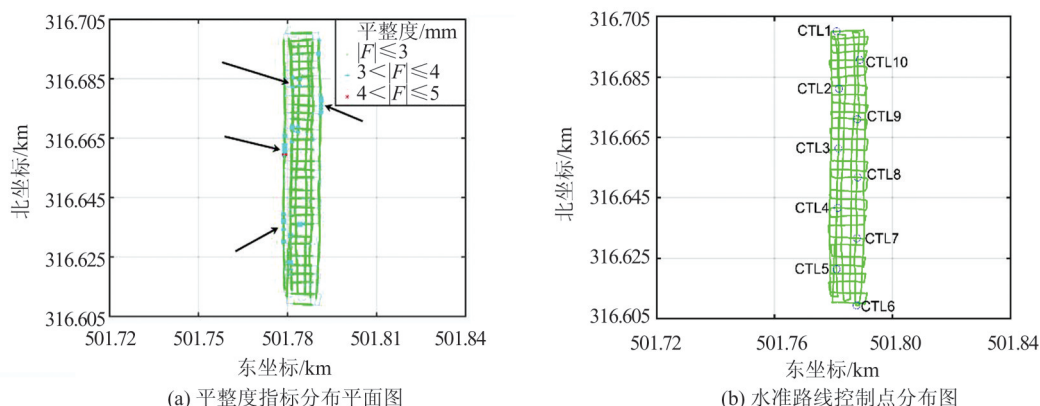


图9 平整度指标与水准路线控制点分布图

Fig.9 Flatness Indicate and Leveling Points Distribution Map

表2 部分平整度超限区域中心位置的坐标及 F 值

Tab.2 Coordinate and F Indicate of Partial Centers of Location with Over-Limit Flatness

不合格程度	序号	东坐标/km	北坐标/km	平整度指标 F/mm
轻微超限	1	501.782 318	316.684 967	3.281
	2	501.791 016	316.678 589	3.504
	3	501.779 266	316.661 377	3.750
	4	501.783 051	316.635 864	3.673
	5	501.780 884	316.624 146	3.455
	6	501.784 088	316.685 181	-3.189
	7	501.790 985	316.676 086	-3.137
	8	501.778 625	316.636 292	-3.340
	9	501.780 945	316.633 057	-3.332
	10	501.778 656	316.630 188	-3.439
中度超限	1	501.779 083	316.658 783	-4.136

使用水准仪对测量结果外符合精度进行验证。在惯性测量小车的移动路线上设置10个控制点CTL1~CTL10,如图9(b)所示,形成一个闭合的水准测量路线,从CTL1开始,依次测量CTL2、CTL3...,直到CTL10后闭合到CTL1。使用天宝DiNi03水准仪与配套的水准尺测量水准路线上相邻两点的高差。同时,它们之间的高差可通过惯性测量得到,将此高差与水准仪测量所得的高差进行比较,结果见表3。由表3可得,水准路线总长227.387 m,闭合差为0.33 mm,使用水准仪和本文方法测量的控制点的高差基本

相差在 ± 1 mm之内,说明本文提出的全站仪/INS组合方法具有较高的外符合精度,可以满足超大室内地坪施工期平整度快速测量的需求。

2.3 冬奥会速滑馆平整度数据整体分析

在施工期对国家速滑馆的速滑大道、训练道和内部场地进行了测量。测量时,根据不同场地地面的形状、面积等特点进行全覆盖、网状交叉的分区测量,典型宽阔面状区域与狭窄跑道的测线分别如图10(a)、图10(b)所示。数据采集完成后,通过自主研发的数据解算软件INSEDTOR进行数据快速解算,对超标平整度数据提供给施工方进行进一步磨光调整。在整个施工过程中,测线长度约为9 946 m,数据采集时间为5.9 h,效率相对传统水准仪有大幅提高。

对施工期全场平整度统计,有大约96.19%的检测点在施工初期就能够满足 $5\text{ m} \pm 3\text{ mm}$ 的验收标准,满足设计要求。在施工期通过对剩余超标的区域进行及时打磨调整,可以使得地坪平整度质量得到进一步改善。在速滑馆竣工后,再次对平整度进行全面检测,通过对比施工期和竣工期数据可以对改善程度进行评估。图11(a)、图11(b)展示了内场南部区域在施工期和竣工期的平整度结果分布情况,可以发现,平整度质量得到大幅提高。图11(c)展示了施工期和竣工期的全场平整度对比结果。通过对全场数据的统计分析,满足 $5\text{ m} \pm 3\text{ mm}$ 的检测点比例提高了约

3%,达到全场 99.15% 的检测点满足要求。在后期场地测试过程中,冰面温差达到 0.5℃,完全满足国际滑联提出的 1.5℃ 温差要求。这也从侧面验证了水泥基底的良好平整度。通过快速平整度检测技术辅助冰面混凝土基底建设,为打造冬奥会“最快的冰”奠定了关键基础。

表 3 高差测量结果对比
Tab.3 Comparison of Elevation Difference Measurement Results

后视点	前视点	水准路线距离 /m	水准仪高差/mm	惯性测量高差/mm	高差对比/mm
CTL1	CTL2	22.002	−1.43	−2.27	−0.84
CTL2	CTL3	22.796	2.00	2.75	0.75
CTL3	CTL4	22.332	−2.34	−2.36	−0.02
CTL4	CTL5	22.639	7.29	7.79	0.50
CTL5	CTL6	22.580	−6.13	−7.01	−0.88
CTL6	CTL7	25.874	1.01	0.11	−0.90
CTL7	CTL8	22.833	−0.85	−0.40	0.45
CTL8	CTL9	22.370	−2.67	−3.62	−0.95
CTL9	CTL10	21.770	6.31	6.94	0.63
CTL10	CTL1	22.191	−2.86	−2.01	0.85

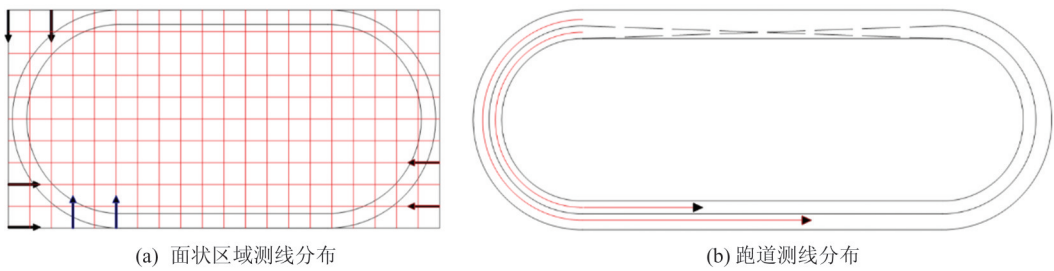


图 10 不同区域测线规划
Fig.10 Measurement Routes for Different Floors

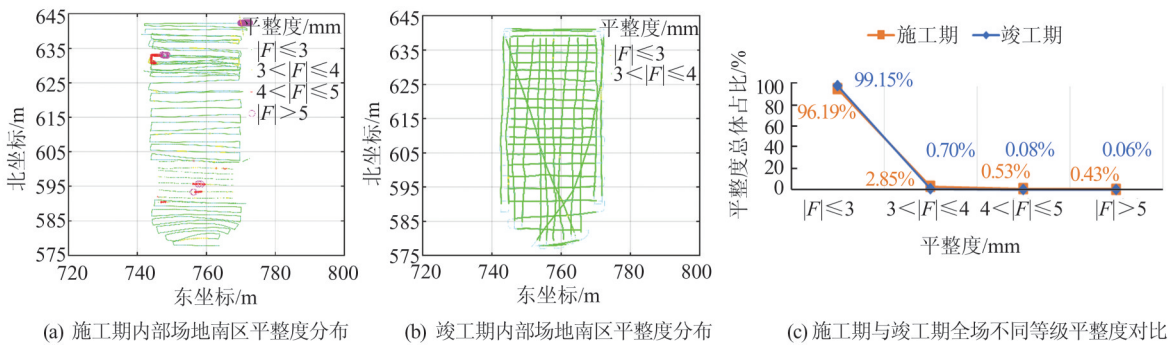


图 11 施工期与竣工期平整度结果对比
Fig.11 Flatness Comparison Between the Construction Period and the Completion Period

3 结 语

针对超大地坪的施工期平整度的测量,传统的平整度测量方法存在效率低等诸多不足。本文提出一种基于全站仪/INS的超大地坪施工期平整度测量方法,使用卡尔曼滤波对惯导和全站仪数据进行融合,从而解算轨迹点的相对高程,计算平整度指标并筛选出平整度超限的位置,实现地坪施工期平整度的快速确定,从而显著提高

了地坪平整度的测量效率,且具有不依赖 GNSS、对初凝水泥地坪的形状影响很小、可以获取地坪上具体位置的局部平整度等特点,为超大室内地坪施工期平整度测量提供了一种快速测量方法。实验结果表明,本文所提方法的内符合精度达到 2 mm/30 m 或 1/15 000,与水准仪进行对比,外符合精度差值小于 1 mm。本文方法在冬奥会速滑馆中成功应用,验证了技术的有效性和效率。该方法不仅能对地坪施工期整体平整度质量进行

评估,而且可以筛选出平整度不符合要求的位置,提取相应的坐标和超限程度,为地坪的磨平工作提供指导,具有良好的工程应用价值。后续可以进一步结合自主移动平台对装备进行自动化改造,提高其智能化水平。

致谢:感谢北京城建集团、武汉大学、国家速滑馆经营公司在项目实施过程中的大力支持;感谢深圳大学动态精密工程测量团队朱家松老师、涂伟老师、夏吉哲老师、薛卫星博士、刘旭博士、谷宇、张海涛提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Finance Department, General Administration of Sport of China. Technical Requirements and Test Methods for Natural Material Sports Field Part 3: Ice Rink: GB/T 19995.3—2006[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2006:1(国家体育总局体育经济司.天然材料体育场地使用要求及检验方法第3部分:运动冰场:GB/T 19995.3—2006[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2006:1)
- [2] Housing and Urban-Rural Development of Jiangsu. Code for Acceptance of Construction Quality of Building Ground: GB 50209—2010[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2010:1(江苏省住房和城乡建设厅.建筑地面工程施工质量验收规范:GB 50209—2010[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2010:1)
- [3] Tang P, Huber D, Akinci B. Characterization of Laser Scanners and Algorithms for Detecting Flatness Defects on Concrete Surfaces[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, 2011, 25(1): 31-42
- [4] Henry R S, Ingham J. Field Measurements of Concrete Floor Surface Regularity[C]//The New Zealand Concrete Industry Conference, Wellington, New Zealand, 2010
- [5] Cheng Guoyong, Guo Wenhui, Lei Yawei. Progress and Developing Trend of Airport Pavement Roughness Evaluation Technology[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2016, 34(2): 36-41(程国勇,郭稳厚,雷亚伟.机场道面平整度评价技术进展及发展方向[J].中国民航大学学报,2016,34(2):36-41)
- [6] ACI 117-10. Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials and Commentary[R]. American Concrete Institute Farmington Hills, MI, USA, 2010
- [7] International A. Standard Test Method for Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers[M]. PA: ASTM International West Conshohocken, 1996
- [8] Uriz P, Osteraas J, McDonald B. Using ASTM E1155 to Determine Finished Floor Quality: Background and Areas for Consideration[C]//The Sixth Congress on Forensic Engineering, San Francisco, California, USA, 2013
- [9] Hutchinson T C, Chen Z. Improved Image Analysis for Evaluating Concrete Damage[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, 2006, 20(3): 210-216
- [10] Zhu Z, Brilakis I. Machine Vision-Based Concrete Surface Quality Assessment[J]. *Journal of Construction Engineering and Management, American Society of Civil Engineers*, 2010, 136(2): 210-218
- [11] Nuikka M, Rönholm P, Kaartinen H, et al. Comparison of Three Accurate 3D Measurement Methods for Evaluating As-built Floor Flatness[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37(B5): 129-134
- [12] Li D, Liu J, Feng L, et al. Terrestrial Laser Scanning Assisted Flatness Quality Assessment for Two Different Types of Concrete Surfaces[J]. *Measurement*, 2020, 154: 107436
- [13] Bosché F, Guenet E. Automating Surface Flatness Control Using Terrestrial Laser Scanning and Building Information Models[J]. *Automation in Construction*, 2014, 44: 212-226
- [14] Li F, Li H, Kim M K, et al. Laser Scanning Based Surface Flatness Measurement Using Flat Mirrors for Enhancing Scan Coverage Range[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 714
- [15] Fan Yiwei, Liang Jianyu, Yao Xiaowen, et al. Method and Apparatus for Automatic Detection of Full-Area Flatness of Measurement Robot Sports Field: CN109084706A[P]. 2018-12-25(范一为,梁健羽,药潇文,等.测量机器人运动场地全域平整度自动检测方法及其装置:CN109084706B[P].2018-12-25)
- [16] Kangas M A. Concrete Screeding System with Floor Quality Feedback/Control: U. S. Patent 9, 835, 610[P]. 2017-12-5
- [17] Jiang Chen. Filtering Algorithms and Reliability Analysis for GNSS/INS Integrated Navigation Systems[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018(蒋晨. GNSS/INS组合导航滤波算法及可靠性分析[D].北京:中国矿业大学,2018)

- [18] Li Yanjie, Yang Yuanxi, He Haibo. Effects Analysis of Constraints on GNSS/INS Integrated Navigation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1249-1255 (李彦杰, 杨元喜, 何海波. 附加约束条件对 GNSS/INS 组合导航结果的影响分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1249-1255)
- [19] Li Q, Chen Z, Hu Q, et al. Laser-Aided INS and Odometer Navigation System for Subway Track Irregularity Measurement [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2017, 143(4): 04017014
- [20] Shi Bo, Lu Xiushan, Chen Yufang. Improving Position and Attitude Precision of GPS/INS by Applying EKF Smoothing Algorithm [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(5): 334-338 (石波, 卢秀山, 陈允芳. 应用 EKF 平滑算法提高 GPS/INS 定位定姿精度[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(5): 334-338)

Rapid Measurement of Flatness of Oversized Floor of Speed Skating Oval in Winter Olympic Games

LI Qingquan^{1,2} LÜ Shiwang^{1,2} CHEN Zhipeng^{1,3} YIN Yu^{1,2} ZHANG Dejin^{1,3}

¹ Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

² College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

³ School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

Abstract: Objectives: Flatness inspection during construction period is critical to ensure the floor perform its desired function after completion. There are some shortages in traditional floor flatness measurement methods based on straight edge or levelling instrument, for example, not all locations in area can be measured and the measurement speed is slow, so that these methods can not fit the fast and accurate flatness measuring requirement of oversized floor during construction. **Methods:** According to the features of target floor, which has large area and is not entirely solid, we present a rapid measuring and calculating method for floor flatness based on inertial navigation system and total station. First, we collect inertial data by inertial measurement sled, and observe the coordinates of the sled by total station. Second, we use Kalman filter to fuse inertial data and the unit's coordinates to solve locations and attitudes of trajectory points. Third, we calculate the flatness indicator according to the elevation of trajectory points. **Results:** Experimental results show that the proposed method has nearly equal accuracy comparing to levelling instrument, with significant improvement in speed performance. **Conclusions:** The proposed method can not only make flatness quality assessment for floor under construction, but also detect and locate the flatness abnormalities so that provide direction for floor grinding. This method has great practical value and a wide application prospect.

Key words: floor flatness; total station; inertial navigation system; Kalman filter fusion; fast measurement; engineering measurement

First author: LI Qingquan, PhD, professor, specializes in in dynamic and precise engineering surveying. E-mail: liqq@szu.edu.cn

Corresponding author: CHEN Zhipeng, PhD. E-mail: chenpz1990@szu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41901412);the National Science Joint High Speed Railway Foundation of China(N2019G012).

引文格式: LI Qingquan, LÜ Shiwang, CHEN Zhipeng, et al. Rapid Measurement of Flatness of Oversized Floor of Speed Skating Oval in Winter Olympic Games[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 325-333. DOI:10.13203/j.whugis20210196 (李清泉, 吕世望, 陈智鹏, 等. 冬奥会国家速滑馆超大地坪平整度快速测量[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(3): 325-333. DOI: 10.13203/j.whugis20210196)