引文格式：许才顼, 周茹彬, 贺杰, 等. 面向高精度GNSS接收机的惯性传感器误差校准系统[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 75-78. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.019

面向高精度GNSS接收机的惯性传感器误差校准系统

许才顼[1]，周茹彬[2]，贺　杰[1*]，庞家豪[1]
（1. 广西机器视觉与智能控制重点实验室，广西 梧州 543002；2. 湖北省地图院，湖北 武汉 430061）

摘　要：针对惯性传感器误差对RTK倾斜测量定位精度的影响问题，设计并实现了一套基于Android平台的GNSS接收机惯性传感器误差校准系统。系统利用蓝牙技术建立与GNSS接收机的通信连接并实现数据的采集与解算，设计基于解析传感器数据的误差改正算法，实现了基于Android平台的误差修正参数的生成与回传，保证了用户在利用惯性传感器辅助接收机工程测量的精度需求。在实际应用中，本系统明显提高了惯导GNSS接收机应用的定位精度，提升了工程测量作业效率，对于惯性传感器在测地型接收机上的应用具有一定的现实意义。

关键词：Android；GNSS接收机；误差校准；RTK倾斜测量；MEMS传感器
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0075-04

Inertial Sensor Error Calibration System for High Precision GNSS Receiver

XU Caixu[1], ZHOU Rubin[2], HE Jie[1], PANG Jiahao[1]
(1. Guangxi Key Laboratory of Machine Vision and Intelligent Control, Wuzhou 543002, China; 2. Hubei Map Institute, Wuhan 430061, China)

Abstract: Aiming at the influence of inertial sensor error on positioning accuracy of RTK oblique photogrammetry, we designed and implemented a set of GNSS receiver inertial sensor error calibration system based on Android platform. By using bluetooth technology to establish a connection to a communications GNSS receiver, the system can realize the collection and calculation of data, in which an error correction algorithm based on the analytical sensor data is designed and implemented to generate the error correction parameters and back it in Android platform, to ensure the accuracy requirement of engineering measurement with inertial sensor assisted receiver. In practical application, the system obviously improves the positioning accuracy of the inertial navigation GNSS receiver, improves the efficiency of engineering measurement, and has certain practical significance for the application of inertial sensor in geodesic receiver.

Key words: Android, GNSS receiver, error calibration, RTK oblique photogrammetry, MEMS sensor

倾斜测量常用惯性传感器主要有加速度计、磁力计、陀螺仪等，虽然部分传感器误差会因出厂标定而有所改善，但在真实应用场景下的零点偏移、环境干扰以及噪声等均是无法避免的实际误差源，其中以磁力计误差受环境的干扰最为突出。针对上述问题，本文重点分析了磁传感器误差的相关因素，设计了基于最小二乘法的磁传感器误差改正模型，实现了基于Android平台的磁传感器误差校准系统。该系统通过采用蓝牙通信建立与接收机的连接，在系统端完成传感器及相关校准数据的采集与拟合解算，并将解算过程的数据存储和将误差改正参数回传接收机用于倾斜测量的实地误差改正。在实际工程应用测试中结果表明，系统对接收机中磁传感器的误差校准效果明显，能有效生成相应的误差改正数，并为GNSS接收机倾斜测量应用提供有力的技术支撑。

1　磁场误差校准算法及原理

磁传感器观测值主要由地球磁场和未知相关磁场干扰项组合而成。受外部环境因素的影响，传感器的输出信号会存在一定的偏差，并不能完全反映地球磁场的真实情况。然而误差的广泛性和复杂性导致难以对其进行逐一改正，故通常广义上将实际应用中的误

收稿日期：2022-03-17；修回日期：2023-04-12。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（61961036、62162054）；广西高校中青年教师基础能力提升项目（2021KY0673）；广西自然科学基金资助项目（2020JJA170007）；梧州市科技开发项目（202002019）；梧州学院校级科研项目（2020C001）。
第一作者简介：许才顼（1991—），硕士，工程师，主要研究方向为GNSS导航应用、地理信息系统、视频图像处理，E-mail：92007119@qq.com。
通信作者：贺杰（1982—），博士，教授，主要研究方向为地理信息系统、数据融合算法、三维可视化等，E-mail：64875130@qq.com。

差因素和干扰项划分为硬干扰和软干扰2种情况，整体的传感器误差模型如下：

$$H=\boldsymbol{K}\times M+G \tag{1}$$

式中，G 为硬干扰，是传感器使用过程中的恒定误差；$\boldsymbol{K}$ 为误差系数矩阵，是未知的误差干扰项；H 为真实的观测值；M 为理论观测值。磁传感器恒定误差可以根据一定的标定后改正，而误差系数矩阵 $\boldsymbol{K}$ 具有不确定性，必须通过间接途径进行误差改正。

真实环境中地磁矢量恒定不变，传感器三轴的运动轨迹是以其自身为圆心，磁场强度矢量为半径的球面。在二维平面上，当绕着任意一轴旋转时，其余两轴输出值在二维平面上是以磁场分量为半径的圆[1]。磁传感器受软磁干扰影响使得圆形轨迹畸变为椭圆轨迹，在硬磁干扰的影响下椭圆轨迹偏离中心点。根据数学性质可知，在二维平面内，椭圆的一般方程的数学表示如下：

$$x^2+Axy+By^2+Cx+Dy+E=0 \tag{2}$$

式中，参数 A、B、C、D、E、F 为线性表达式的一般参数；当圆锥曲线表示为椭圆时，在解析几何中椭圆可以使用椭圆的标准方程来描述，设椭圆长半轴为 a，短半轴为 b，椭圆旋转角为 α，圆心坐标（x_o,y_o），可推导几何参数与圆锥曲线参数之间满足如下数学关系[2-3]：

$$\begin{aligned}
x_0&=\frac{BE-2CD}{4AC-B^2}\\
y_0&=\frac{BD-2AE}{4AC-B^2}\\
\alpha&=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{B}{A-C}\right)\\
a&=\sqrt{\frac{2(Ax_0^{\,2}+Cy_0^{\,2}+Bx_0y_0-1)}{A+C+\sqrt{(A-C)^2+B^2}}}\\
b&=\sqrt{\frac{2(Ax_0^{\,2}+Cy_0^{\,2}+Bx_0y_0-1)}{A+C-\sqrt{(A-C)^2+B^2}}}
\end{aligned} \tag{3}$$

在二维平面中真实环境磁传感器的各轴输出值已知，以固定某轴旋转磁传感器并完成在平面类的各象限范围的数据采样（$n>5$），结合最小二乘法原理对采样数据进行拟合，可以求解出最优椭圆参数 A、B、C、D、E，其中，椭圆的最小二乘法拟合方法应满足曲线方程的平方和最小化，其数学表达式如下：

$$f(\mu)=\sum_{n-1}^{N}(x^2+Axy+By^2+Cx+Dy+E)^2 \tag{4}$$

式中，μ 为椭圆参数 A、B、C、D、E，为了求得 $f(\mu)$ 最小值，需将函数 $f(\mu)$ 对其参数求偏导数且使偏导值为零，即可得到椭圆参数的最小估值，则有：

$$\frac{\delta f}{\delta A}=\frac{\delta f}{\delta B}=\frac{\delta f}{\delta C}=\frac{\delta f}{\delta D}=\frac{\delta f}{\delta E}=0 \tag{5}$$

根据最小二乘法拟合性质，联立方程（4）和（5），求解下述方程组便可求解得到椭圆拟合的参数 A、B、C、D、E 的值：

$$\begin{bmatrix}
\sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i^2 & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i^3 & \sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i^2 & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i^3 & \sum_{i=1}^{N}y_i^4 & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i^2 & \sum_{i=1}^{N}y_i^3 & \sum_{i=1}^{N}y_i^2\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i^2 & \sum_{i=1}^{N}x_i^2 & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i & \sum_{i=1}^{N}x_i\\
\sum_{i=1}^{N}x_iy_i^2 & \sum_{i=1}^{N}y_i^3 & \sum_{i=1}^{N}x_iy_i & \sum_{i=1}^{N}y_i^2 & \sum_{i=1}^{N}y_i\\
\sum_{i=1}^{N}x_iy_i & \sum_{i=1}^{N}y_i^2 & \sum_{i=1}^{N}x_i & \sum_{i=1}^{N}y_i & N
\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A\\B\\C\\D\\E\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}
\sum_{i=1}^{N}x_i^3y_i\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i^2\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^3\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^2y_i\\
\sum_{i=1}^{N}x_i^2
\end{bmatrix} \tag{6}$$

在求解得到椭圆参数之后，由于二维平面坐标系内，任意椭圆轨迹均是由圆心在原点的圆经过长短轴拉伸、水平轴旋转、圆心坐标的偏移等一系列的变化所得，X_e,Y_e 表示二维平面椭圆的轨迹方程，椭圆畸变过程的数学表达如下：

$$\begin{bmatrix}X_e\\Y_e\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha\\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a & 0\\0 & b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_0\\Y_0\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}x_0\\y_0\end{bmatrix} \tag{7}$$

同理可证，对上述公式（7）椭圆表达方程进行逆过程，便可得到椭圆转化后的圆形轨迹，拟过程数学表达式如下：

$$\begin{bmatrix}X_0\\Y_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a & 0\\0 & b\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\cos\alpha & \sin\alpha\\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix}^{-1}\left(\begin{bmatrix}X_e\\Y_e\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}x_0\\y_0\end{bmatrix}\right) \tag{8}$$

式中，X_o,Y_o 为圆的轨迹方程，即为改正后的传感器数据。

2 惯性传感器误差校准系统的设计与实现

通常GNSS接收机硬件平台无法支撑复杂而又繁重的数据处理，需要通过无线通信将数据传输至PDA手簿并由手簿完成相应工作，这样也进一步增加了接收机的作业用途的拓展，减小了相应的作业成本，取得了广泛的推广应用。Android平台因其完全开源、系统稳定、适配度高等特点，不仅摆脱了运行商的束缚，而且也降低了相应的开发成本，已在智能终端中占据78%以上的市场份额[4-5]。因此，本文设计并实现了一套基于Android平台的GNSS接收机惯性传感器误差校准系统，为实际的RTK倾斜测量中惯性传感器的使用提供参考。

2.1　系统总体架构

基于Android平台的GNSS接收机惯性传感器误差校准系统主要由3个部分组成：数据处理模块、无线通信模块、传感器校准模块。其中通信模块负责获取数据，传感器校准模块完成数据的准备，数据处理模块则完成校准算法和校准结果的反馈。

2.2　系统主要功能设计与实现

惯性传感器误差校准系统借助Android Studio平台进行开发，通过一系列自定义组件和MVC模式完成逻辑层和数据之间的解耦分离，并利用SQLite数据库、XML及TXT等文件格式进行相关数据的存储，为后期校准功能的评估和测试提供依据，完成实时条件下各子系统下的相关模块功能。

2.2.1　无线通信模块功能

在实际作业中，通常需要建立接收机与PDA之间的无线通信连接，以此完成接收机观测到的卫星原始数据的相关处理。Android平台的PDA手簿其底层已提供了完备的蓝牙、WiFi等通信模块的API接口，当以接收机作为服务端时，PDA手簿可以在小范围内以客户端的方式对接收机进行快速搜索，当搜索到相关设备后，通过服务端唯一标识，借助Socket建立两端之间的通信连接，并实现串口模式下的数据流输入和输出，直至通信连接终端未知。同时，对于接收机的控制需要不定期向接收机发送相应的控制指令，主要实现内容有：通信模式选择、设备的搜索、仪器连接、串口调试和接收机设备类型的选择等。选择接收机仪器和通信模式后，数据处理模块将进行数据处理接口的初始化，设备搜索则会显示出可通信的设备名称与设备唯一地址，选择连接设备后即可建立通信完成数据的交互。综上，通信模块功能的具体流程主要有：①选择接收机设备类型与通信方式；②搜索附件的可连接设备的唯一串号；③选择指定主机建立连接；④数据处理初始化及控制指令的交互；⑤保持通信连接与数据交互。

2.2.2　数据处理模块功能

数据处理模块是一个线程管理类，主要负责系统数据的维护、运算和管理工作。其主要用途是将实时接收的GNSS接收机原始数据进行解析备用，并利用相关数据协议将原始数据转换得到姿态角、位置信息等实际解析数据，然后采取自定义消息处理机制广播至全系统使用。数据处理线程中包含了通信数据流IO接口、数据解析接口和通信状态接口，提供了面向原始数据的姿态计算算法、相关误差改正数生成策略，是整个系统中数据的源头和汇集模块，各类原始数据经过数据处理模块的算法计算处理后最终得到实际误差校准中所需的各类成果数据并以广播的形式共享至系统的各个模块。该模块的主要工作流程为：①建立通信连接后Socket持续监听等待，直到缓冲区中有数据；②不断的读取缓冲区数据，并进行读取数据的逐行分割与解析；③生成姿态、位置数据参数；④计算相关误差改正参数；⑤通过事件机制广播计算的成果数据。

2.2.3　传感器校准模块功能

传感器校准主要完成传感器误差补偿算法相关数据的采集和计算，其中涉及传感器在水平和竖直2种情况下旋转一周的磁场数据的图形化显示，磁场数据的保存、椭圆拟合参数的计算等。如图1和图2水平与竖直方向数据的采集主要是以传感器Z轴和Y轴为固定轴进行旋转的2种采集状态下的磁场数据，本文系统以自定义控件的方式实现采集数据和过程的图形化显示，其中包含了传感器数据轨迹的二维平面展示、采样状态和进度条可视化、采集过程的倾斜角等。待所有数据采集完成后，按照一定的取样规则进行采样后，执行“校准”过程实现椭圆拟合参数的计算并回传至接收机备用。

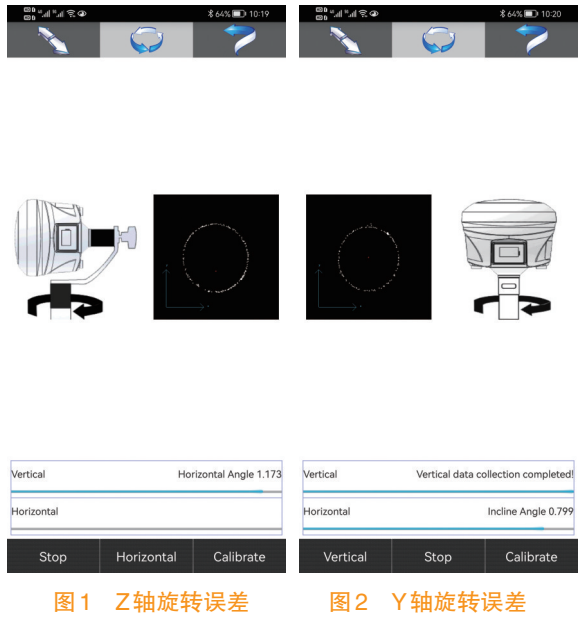


图1　Z轴旋转误差校准数据采集界面　　图2　Y轴旋转误差校准数据采集界面

本文所设计的系统兼容Android 4.0以上版本，实现了磁场误差校准算法且采集并保存了大量的相关数据，不仅能可靠且实时地完成误差参数的计算，还能为后期实验数据的验证提供帮助，具备了较好的适用性和实效性。

3 系统应用与算法结果分析

为了有效地验证系统软件的适用性和有效性，选择集成了三维磁传感器的高精度GNSS接收机配合本文所述系统进行实地测试。实测环境中，采用5 Hz的输出频率输出磁传感器观测值，并记录下绕水平和竖直2种状态下旋转一周后的磁场数据，在Matlab软件上对比原始数据形成的轨迹和采用本文椭圆拟合算法模拟误差修正后的轨迹图。

测试结果表明：在当前实测环境下磁场轨迹变形相对不明显，但其圆形存在一定的偏移情况，说明当前环境中受到了一定程度的硬磁干扰，而软磁干扰相对较小，在经过校准后，经过椭圆拟合后实际磁场圆心回归至原点且呈现为圆形轨迹。充分证明了本文磁传感器改正算法的有效性。

4 结 语

本文设计了基于最小二乘法的磁场误差校准算法，并利用Android Studio平台自主研发了面向高精度GNSS接收机的磁传感器误差校准系统，介绍了本系统的整体结构、功能模块和工作流程。本系统集成于Android PDA手簿之中，通过利用短距离无线通信建立与接收机的通信连接，并获取相应的原始数据完成数据解析、数据采集和数据计算，进而实现满足实际应用需求的磁传感器误差校准。系统具有高度集成化、操作流程简便、使用稳定等特点，提高了GNSS接收机误差校准的工作效率，具有一定的推广应用价值。对于三维空间下的磁场校准本文通过将其分解至2个垂直二维平面的误差校准的结合，如何直接针对三维空间下进行椭球的直接拟合算法，有待后续进一步研究实现。

参考文献

[1] Moulin,Guodon J C,Marsy J M,et al. Process for Compensating the Magnetic Disturbances in the Determination of a Magnetic Heading, and Device for Carrying Out This Process:4414753[P].1983-11-15

[2] 朱森荣,刘杰徽. 基于最小二乘法椭圆拟合的改进型快速算法[J].舰船电子工程,2022,42(1):33-35

[3] 闫蓓,王斌,李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(3):295-298

[4] 余其鹏. 基于Android平台的地震应急系统设计与实现[J]. 地理空间信息,2020,18(7):72-77

[5] 刘静,王珍,王凯. 基于Android的精密导线内外业一体化系统研究[J]. 地理空间信息,2020,18(10):70-73

（上接第74页）

统，系统包括成果在线汇交、规则定义管理、合规性检测三大模块。一是通过成果在线汇交汇聚各类空间规划成果形成可层层叠加打开的“一张蓝图”，确保合规性检测所依据的空间规划是全面的。二是通过规则定义管理模块降低了配置人员对代码编写能力的要求，使得业务人员也可以基于可视化配置界面对规则进行配置和管理，同时通过引入规则引擎技术降低规则与后台代码的耦合度，提高系统的灵活性。三是研发合规性智能检测模块，实现一键自动生成结论及指引，使得不具备规划经验知识的实施主体也可快速、精准获取建设项目用地方案存在的空间问题及其解决方案，同时通过将该模块置入建设项目实施策划、审批阶段，可进一步强化对建设项目的全过程传导管控。相较于传统的核查工具，本系统所产生的结果更加精准可靠、灵活性更强，支撑建设项目合规性审查从人机共审转向自动化审查。

参考文献

[1] 林继贤,周志刚,陈蔚珊. 基于大数据的内涝智能指挥系统研究与应用[J]. 地理空间信息,2022,20(3):63-67

[2] Eastman C, Lee J M, Jeong Y, et al. Automatic Rule-based Checking of Building Designs[J]. Automation in Construction, 2009,18(8):1 011-1 033

[3] 付一凡. 基于Rete算法的规则引擎设计及在学科智能导学中的应用[D]. 长春:东北师范大学,2009

[4] 蒋晓炜. 基于本体的规则推理在公共卫生应急指挥系统中的应用[D]. 上海:东华大学,2008

[5] 成敏. 基于规则引擎的动态工作流模型研究与设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2009

[6] 周童飞. 个性化学习中适应性引擎的研究[D]. 镇江:江苏大学,2018

[7] 徐震. 基于业务规则的图书馆信息系统研究[J]. 图书馆学研究,2010(5):34-38