

基于单线激光雷达的嵌入式测量系统研究

赖振彬, 李金桃, 李洋, 杨恒

(贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵阳 550006)

摘要: 为提高建筑尺寸测量精度和平面图绘制及三维模型构建速度, 提出一种基于单线激光雷达的扫描测量系统设计方案; 通过嵌入式系统的开发, 打造一款现场快速扫描测量系统; 利用最小二乘法和四元数法将扫描点云数据进行矫正和补齐, 实现建筑内部空间简易、高精度、高效率的尺寸测量和平面图绘制; 最后对测量系统性能进行测试和分析, 表明系统有着较高的精度和较快的平面绘制速度; 在雷达测量半径范围内定点测量单向误差为 22.2 mm, 手持测量系统测量时的单向误差不超过 23.9 mm, 经倾角矫正后与实际尺寸误差不超过 18.2 mm; 系统通过横、纵切环扫描即可快速获取门、窗、梁、柱的尺寸、位置等多重信息, 在测量弧形、多边形等非矩形空间时有着良好的平面图绘制效果和较高的测量精度, 能有效提升建筑空间尺寸的测量和平面图绘制效率。

关键词: 微处理系统; 交互界面; 单线激光雷达; 切环测量; 点云数据

Research on Embedded Measurement System Based on Single Line Lidar

LAI Zhenbin, LI Jintao, LI Yang, YANG Yuan

(Guizhou Construction Science Research and Design Institute Co., Ltd. of CSCEC, Guiyang 550006, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of buildings and the speed of drawing floor plans and constructing 3D models, a scanning measurement system scheme based on single-line Lidar is proposed. By developing an embedded system, a fast on-site scanning measurement system is provided. The scanning point cloud data are corrected and complemented by using the least squares and quaternion methods to realize easy, high-precision, and efficient measurements and floor plan drawings in the building. Finally, by analyzing and testing the performance of measurement system, the results show that the system has high accuracy and fast drawing plan speed, the unidirectional error of fixed-point measurement within the radius of radar measurement is 22.2 mm, the unidirectional error of the hand-held measurement system is no more than 23.9 mm, and the error with the actual size after tilt angle correction is no more than 18.2 mm; the system can quickly obtain the dimension and position information of doors, windows, beams, and columns through scanning transverse and longitudinal cutting rings. With non-rectangular spaces such as arcs and polygons measured, this system has a good plan drawing effect and high measurement accuracy, and can effectively improve the efficiency of measuring buildings and drawing floor plans.

Keywords: microprocessor system; interactive interface; single-line Lidar; scanning measurements; point cloud data

0 引言

越来越多建筑步入设计使用寿命的中后半程, 不少建筑已出现不同程度的安全隐患, 需要进行安全评估。然而由于建造年代久远、物业更换、使用维护不当以及功能改造等原因造成原始图纸资料丢失或与实际情况不符, 需详尽勘测其尺寸及建立准确模型来验算其安全性

能。缺失资料的建筑物的可靠性评估以及抗震鉴定通常是一件很繁琐的事情^[1], 详细尺寸测量工作是构建建筑模型进而验算其安全性能的基础工作。激光雷达具有精确的长度测量, 可以提供一个准确的景深信息^[2], 随着激光技术的不断发展, 非接触激光技术逐渐作为主导, 该方法具有实时性等优点, 能够满足快速生产线的要求^[3]。目前用于建筑逆向建模的测量手段主要有架站式

收稿日期:2024-02-28; 修回日期:2024-04-08。

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3804303);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2023]一般393);中建四局科研课题(CSCEC4B-2023-KTA-3);中建股份科技研发课题(CSCEC-2024-Q-70)。

作者简介:赖振彬(1987-),男,高级工程师。

引用格式:赖振彬,李金桃,李洋,等.基于单线激光雷达的嵌入式测量系统研究[J].计算机测量与控制,2025,33(5):13-18,28.

全景扫描建模、多线手持式移动扫描建模、基于景深摄影（倾斜摄影、AR 测量）的测量建模、人工测量绘图，但在实际应用中均或多或少存在着不足。①架站式、多线激光雷达一次扫描测量可获取高精度的大面积的数字高程数据，其特点是数据量大，物体还原度高以及测量精度高可以达到毫米级，但其点云数据数百甚至数千万条，点云数据清洗工作量巨大，对算力要求极高，且激光雷达设备价格昂贵，其多用于古建筑保护等重点项目。②倾斜摄影测量是获取三维设计平台基础数据的主要勘测方法，具有建模效果好、可对成果影像进行包括高度、长度、面积、角度、坡度等的量测、可批量提取及贴纹理、能够有效的降低城市三维建模成本、数据量小等特点。由于倾斜摄影技术采用可见光进行测量，对天气要求较高，并且对密集植被下的地形无能为力，对细小物体的建模能力不足，其可以获取具有真实纹理的三维数据，适合作大范围三维建模、一些对精度要求稍低的三维工程测量应用。③人工测量通常利用 GNSS-RTK、全站仪或激光测距仪等传统测量工具获取数据，其测量精度同样可以达到毫米级，在此基础上利用 3DMax、Skyline 等三维建模软件人工建模，工作量大，费时费力，生产成本高，效率极低。④建筑信息模型（BIM）建模速度快，参数自动计算，需要专业软件和技能，不适合现场测量，对于缺失图纸或原始资料的老旧建筑缺乏有效的建模技术手段。

随着安全评估市场的扩展，逆向建模需求越来越大，激光雷达凭借其测量速度快、精度高和点云信息丰富的特点也越广泛地用在建筑尺寸测量领域。国内外越来越多的学者利用激光雷达点云数据对建筑物室内外结构环境进行实景恢复的相关研究，主要围绕建筑物边界线提取、室内地图典型要素（门、窗、楼梯、走廊等）分类以及室内外三维模型等方面^[4-8]。激光扫描快速采集数据的特点促进其在线测量技术应用于工程上的迅速进步，室内的三维测量可借助激光雷达测量并显示，完美体现了室内三维测量在装修公司、房地产业、室内地图等^[9-10]领域的应用价值。激光雷达扫描测量装置是获取建筑尺寸、构件位姿等信息的高效技术手段，其可分为多线激光雷达和单线激光雷达，两者测量精度相当。多线激光雷达点云数据承载信息更为丰富，单线雷达则胜在数据处理速度。针对多线激光雷达应用于建筑尺寸测量及平面绘制的制约因素和传统测量方式缺失数字化描述等问题，本文利用单线激光雷达测量精度高，点云数据相对较少以及处理速度快等优势，基于嵌入式系统，利用四元数位姿矫正法、最小二乘法和泊松方程滤波方法，提出一种精度、效率高、轻量化、测量建模一体化的经济型扫描测量的系统，实现建筑房间尺寸数字化测量及平面图自动绘制的方法，操作简单，测量精度

和效率高，为建筑尺寸自动测量和平面绘制数字化提供基础。

1 系统测量原理及计算过程

本文采用单线激光雷达和方位角度传感器组成扫描测量系统，通过激光雷达获取建筑内部空间尺寸信息，方位角度传感器同步捕获测量过程中每一测量点雷达与水平面的倾斜角度信息，用倾角数据计算出真实的房间尺寸信息并绘制建筑平面图，其工作原理如下。

测量系统通过水平和垂直扫描测量方式来获取建筑室内空间体的扫描横纵切环及其点云数据，点云数据包含激光发射点到墙体间的距离、点云水平倾角等信息数据。切环点云数据经过旋转矩阵算法和图形矫正后即可同时获得室内房间空间体的长宽高尺寸信息和确定门窗、梁柱等位置信息。有遮挡物时通过建筑建造通则和模数规则建立识别算法，剔除家具等非建筑围护结构即可获得建筑平面图。在不需房间净高的情况下，至少一次即可获得建筑室内平面的长宽数据，且在非矩形等异型建筑的测量中更具优势，一次测量即可快速绘制含门、窗、梁、柱等构件准确位置的室内平面图，较传统测量方式减少了操作人员的同时提高了建筑工程平面图绘制工作效率。

2 系统功能设计

在建筑现场进行内部空间扫描时往往期望所见即所得，完成扫描即可在移动终端展示梁、柱、门、窗等构件位置、尺寸等信息的建筑内部空间的平剖面图。现场可视化、高精度测量技术是建筑工程中室内测量的重要环节^[11]，测量终端轻量化、现场扫描测量可视化、图形编辑简易化、数据传输即时化成为工程技术人员期望。为实现嵌入式系统对传感器信号的高速、稳定采集、需设计相应的嵌入式硬件部分^[12]，方案以 ESP32 单片机为主控芯片（以下简称主控芯片），选配单线激光雷达、方位角度传感器、示廓器、电源控制电路、液晶显示屏，通过供电电路及其外围电路设计，研制一种基于嵌入式系统的单线激光雷达扫描系统，实现建筑内部空间构造非接触式的快速、真实、实时可视化扫描测量，主要功能模块如图 1 所示，包含扫描功能模块、控制功能模块和演示功能模块。

2.1 扫描供能模块

扫描功能模块由单线激光雷达、方位传感器和示廓器组成。激光雷达负责采集空间尺寸信息，方位传感器负责采集扫描过程中激光雷达俯仰角度信息，示廓器发出激光线为操作者提示当前手持终端与扫描空间水平面的铅锤状态，方便及时调整终端水平，避免终端与空间水平面的倾角过大，影响扫描测量质量。

电源管理：电源模块要管理锂电池充电同时提给各

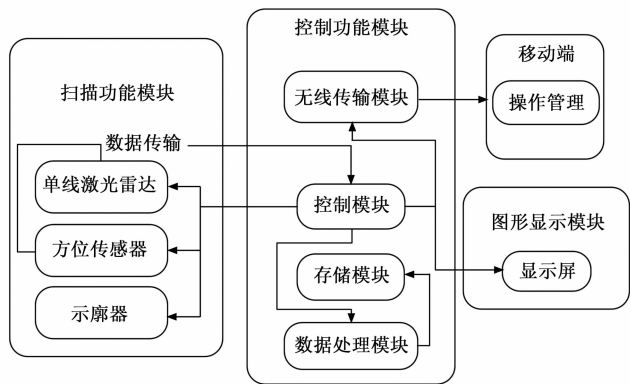


图 1 测量系统功能图

个模块合适的电压^[13], 系统电源管理单元采用 TP405-7ST26P 芯片, 其功能为电池充电管理、主控芯片、传感器、存储模块供电, 是整个扫描测量系统工作的驱动力来源。

数据采集: 根据激光雷达测量原理, 手持终端在测量过程中发生侧倾, 致使测量值将大于实际值而产生测量误差, 对测量系统的精度有直接的影响^[14], 在数据采集内容上就需要包含距离、倾角等数据用以纠正因倾斜产生的测量误差。手持测量终端选用数据采集频率为 10 Hz 单线激光雷达作为采集距离信息和采集频率为 100 Hz 的陀螺仪作为采集手持终端测量过程中倾斜角度信息的方式, 扫描测量获取关键数据。

2.2 控制功能模块

数据传输模块: 扫描测量系统采集的数据有距离、倾角等信息, 在完成某一空间平面图扫描后采集到的数据需要及时传输至程序中进行处理, 方便掌握所采集到的数据是否符合要求。手持测量终端利用主控芯片模组的无线传输功能来实现数据的传输。主控芯片模组获取雷达和陀螺仪采集到的数据进行简单的加密打包处理后通过蓝牙无线传输模块发送至移动端, 在此进行数据的处理和演示。

数据存储模块: 扫描测量系统采集的距离、方位、角度等各种数据数量大; 尤其是在较大型的室内所需要遍历的点较多, 计算量大, 实时性较差^[15], 考虑主控芯片的算力及存储能力及保证存储数据的安全性、可靠性和读取速度, 系统采用 SPI 模式将采集到的建筑内部空间信息存贮到 SD 卡存储模块中。

数据处理: 测量装置第一步将接收到的距离和倾角数据进行解码, 第二步根据设定规则对点云数据进行滤波精简, 随后对点云数据进行位姿矫正, 并在此基础上展开线性拟合、拼接得到被测空间的水平和垂直方向的平面图, 进一步地可以运用布尔交集运算绘制被测空间的三维模型。

3 系统软件方案设计

为了更直观显示扫描的数据和周围环境的轮廓, 需要设计测量系统的上位机软件。系统软件分为手持测量终端的嵌入式程序和移动端操作软件。移动端数据处理软件功能包括测量数据的接收、解码、存储、处理、房间平面图绘制、各房间平面图拼接和展现, 其作业流程如图 2 所示。测量终端驱动程序功能包含与移动端通讯、传感器驱动、扫描测量数据的获取、暂存和传输。

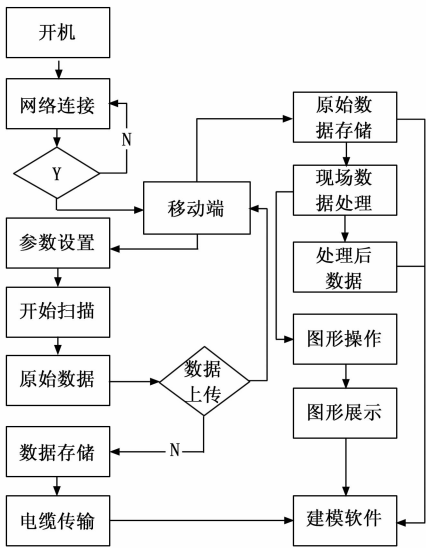


图 2 系统作业流程

3.1 业务管理层

数据处理软件是实现测量终端的控制、数据采集和数据传输等指令的计算机软件程序。基于 C 语言设计一款多功能人机交互的移动端数据处理软件, 实现硬件控制、扫描数据传输、保存、平面图绘制和展示, 其模块包含静态页面、功能模块和算法库。

3.1.1 静态页面

提供人机交互操作界面及控制扫描测量作业, 同时还可以对楼层扫描图像进行拼接、传感器数据预览可视化的操作界面。

3.1.2 后台数据处理

提供点云滤波、矫正、线性拟合等绘制被测空间平面图的前置功能。

1) 二维点云去噪、滤波:

受被扫描目标门窗洞口等不闭合的特性和仪器本身的影响, 采集的点云数据中不可避免地存在一些噪声。噪声点不仅增加了点云的数据量, 还影响了建模、信息提取的精度, 需要通过设置滤波器去除扫描测量过程中产生的噪声。系统基于泊松方程、正态估计等方法, 将离散的、不完整的点云数据转换成具有完整几何形状的点云数据, 依据点云轮廓、相对位置等信息对点云特征

特点提取与降噪,增大点云数据的信息表达能力,剔除杂物产生的噪声,只保留梁、柱、墙等结构特征的点云,通过对点云数据和围护结构信息的匹配,采用最优表述建筑内部空间平面的框线图,提取完整表述建筑内部空间的框线图。

2) 切环点云数据的倾角矫正:由于是测量终端采用环切方式扫描测量被测空间,在扫描过程中难以时刻保持水平,实际扫描切环与预期扫描环之间会因倾斜产生一个夹角,造成得到的激光发射点到四周墙体之间的测量距离与实际距离出现偏差,导致后期建筑模型建立过程中出现空间体扭曲、违背建筑物建造通讯规则甚至后期建筑整体模型出现邻近空间不规整、拼接不吻合等严重问题。通过姿态角度测量传感器获取的方位信息,读取实际扫描切环与预期扫描平面之间的夹角,运用三角变换关系,将实际扫描切环点云数据的坐标转换成预期扫描平面点云数据的坐标,实现实际扫描切环点云数据坐标向预期扫描平面的转换和修正。

扫描设备获得的点云数据,通常包含坐标和法向信息^[16]。系统采用 MPU-6050 传感器对采集终端测量过程中的角速度、角加速度进行测量,系统采用的方位传感器的采集频率比激光雷达的采集频率高,因此可以保证激光雷达的采集到的每个距离信息都能有与之对应的倾角数据信息。使用四元数算法根据 x 、 y 、 z 三个轴上采集到的数据对扫描测量装置实时姿态进行解算^[17]。以单线雷达获取的点云数据的中心点为矫正基准点 $\vec{A} = (x, y, z)$,矫正后的修正点为 $\vec{A}' = (x', y', z')$,已知矫正的欧拉角分别为偏航角(垂直方向) γ 、翻滚角(水平方向向东即 X 轴) α 、俯仰角(水平方向向北即 y 轴) β ,则 $\vec{A}$ 和 $\vec{A}'$ 关系的表达式为:

$$\vec{A}' = \mathbf{R}\vec{A} \quad \text{即} \quad \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

由 $\mathbf{R} = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma)$ 推导得出 $\mathbf{R}$ 的表达式为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\gamma\cos\alpha & \sin\beta\cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma\cos\alpha - \sin\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

将扫描点所在平面作为基准平面,那么法向量为 $c = 1, a = 0, b = 0$,则有:

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

另外,我们采用四元数的方法计算点云数据所在平面偏转后的法向量:假设三维旋转变换对应的单位实四元数:

$$\mathbf{Q} = q_0 + q_1\vec{i} + q_2\vec{j} + q_3\vec{k} \quad (4)$$

将 $\mathbf{Q}$ 代入式 (2),通过变换公式可以得出四元数与旋转矩阵的变换关系式^[18]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用四元数与欧拉角的转换公式 (6):

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过旋转后点 $\vec{A} = (x, y, z)$ 转换为 $\vec{A}' = (x', y', z')$,基于单元实四元数的法向量旋转表达式为式 (7):

$$\begin{bmatrix} q' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} q \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mathbf{Q}^{-1} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{Q}^{-1} \quad (7)$$

通过以上式子的运算即可求出矫正后的点云数据 A 的 x 、 y 、 z 轴数值。对比公式 (3) 和公式 (6) 我们可以发现,四元数转换明显优于旋转矩阵的方案,在旋转矩阵中需要 9 个储存参数,四元数只需要 4 个参数,使用四元数拥有计算速度快、存储空间较小、便于程序实现、平滑插值等优点,并且四元数还避免了使用旋转矩阵可能出现的“万向节死锁”即欧拉方程的奇异性问题^[19-21]。所以选择四元数的旋转变换方式来对激光点云数据所在平面进行三维仿射变换,计算偏转后的平面法向量。

3) 扫描切环上异常点线的识别及切环修正:根据物体表面尺寸、位置等多元特征参数和建筑内部构造(墙、柱、梁、门、窗等具备一定模数特征的建筑构件)以及附属设施(家具等)的特征属性,去除扫描切环上非建筑主体构件的点云并将除门窗洞口之外的未闭合的切环弥补修正,获得完整、准确的单个房间室内特征轮廓线。

利用激光雷达对点云进行连续发射和接收时,采样数据以离散点云的形式存在^[22],根据分段直线拟合的基本思路,结合二维线框拟合的实际需要和试验效果,考虑到扫描噪点会影响直线分段的情况,在减少计算机的计算量、直线的分段数和提高断点判断准确性的前提

下提出一种基于最小二乘法的分段线性数据框拟合方法。以雷达旋转初始角(即启动角)的点云为起点,选取 $(x_1, y_1) \cdots (x_i, y_i)$ 进行最小二乘法拟合为一段直线 l_i ,重复以上操作得到选取点拟合出的直线的表达式为 $A_nx + B_ny + C_n = 0$ 和其斜率分别为 $K_1 K_2 \dots K_n$,设相邻两端分段直线之间的夹角为 θ_n ,则各线段之间的夹角由式(8):

$$\theta n = \arctan \frac{k_{n-1} - k_n}{1 + k_{n-1} k_n} \tag{8}$$

利用式(8)分别求出各分段直线之间夹角,设定一定的阈值,如果两线夹角小于设定阈值则可以认为两分段直线在同一直线上,再次利用最小二乘法将两分段直线拟合为一段直线,如此往复拟合直至全部线段完成拟合。根据建筑二维平面线框图的特点,若 θ 小于 15° ,则将 (x_{i+1}, y_{i+1}) 放到前面的点中重新拟合直线方程。若 θ 大于 15° ,第一段拟合的直线方程就为 $y = ax + b$,然后把 $y = a'x + b'$ 作为新的第一条直线方程,将 (x_{i+1}, y_{i+1}) 、 (x_{i+2}, y_{i+2}) 、 (x_{i+3}, y_{i+3}) 重复以上步骤,直至拟合完所有点云数据,就得到了分段直线的拟合结果。

建筑单个内部空间二维平面图绘制:基于建筑内部构造特有的规则性,根据获取到的环切点云数据提取内部空间的特征轮廓线来表征建筑“平、立、剖”面的构造,勾勒建筑内部空间梁柱等重要连结点,生成建筑单个内部空间二维框线图。

3.2 交互应用层

交互应用层的作用是通过移动端数据处理软件实现测量系统的扫描操控并通过无线网络进行扫描数据的即时传输、数据保存、现场简易拼接等操作,将扫描到建筑内部空间点云数据简单处理后绘制出建筑内部空间的轮廓线并在移动端展示,供初步判定该轮廓线是否与实际相对应。移动端操作界面提供扫描操作、新增扫描、横纵向选择等按键和当前扫描尺寸信息及最新扫描数据,点击完成扫描按键后显示信息会更新为最新一次的扫描结果。

3.3 通讯层

嵌入式程序设计开发是指在嵌入式系统中开发应用程序,以便实现特定的功能。为保证数据获取的有效性,将数据采集结果通过通信网络传输至中央处理设备中,对其进行数据预处理^[23],本系统嵌入式程序主要功能是与移动端保持通讯、执行操作指令、传感器驱动、传感器数据采集、加密封装数据回传并本地保存。一是根据移动端指令要求对传感器进行数据采集并存储在本地存储卡;二是将采集到的数据通过 TCP 回传到移动端并进行初步处理和显示;三是控制功能,测量终端接收移动端指令,驱动并控制传感器动作。除此之外,根据实际使用情况提供电源急断、微机重启和复位

控制功能。测量终端嵌入式程序主要控制初始化、激光雷达传感器子程序、方位传感器子程序部分。

4 试验结果与分析

本文选用 LD Robot 的 DTOF STL-19P 激光雷达和维特智能的 BWT61CL 型 6 轴姿态角度传感器作为扫描测量系统的主要传感器来完成扫描测量系统的机械结构设计和制作。LD19 激光雷达采用短脉冲功率 905 nm 激光器,其每秒可进行 4 500 次测距,有效测量范围为 0.02~12 米,测量精度为±30 mm。WT61CL 测量维度为加速度、角速度和角度都为 3 维,量程为加速度±16 G,角速度±2 000°/S,角度±180°,姿态测量精度为 0.05°。为验证本文设计制作的扫描测量系统中实际中是否满足实际使用要求,本文采用固定式和移动两种方式分别对其功能进行测试和验证。

4.1 系统试验分析

4.1.1 定点测量误差分析

以固定方式将测量终端放置于房间几何中心点,展开水平、竖直剖面的扫描测量测试。雷达测量半径范围 0.02~12 m,从 0.02 m 开始依次增加测量距离并在整数距离位置分别测量 10 次并取其对应的最大误差值数据,最大误差测量数据如表 1 所示。由表 1 可以看出,6~12 m 的最大误差为 22.15 mm,1~6 m 的最大误差为 19.20 mm,0.02~1 m 的最大误差为 3 mm,超出雷达测量半径外时误差明显增大,在 15 m 处雷达接收到的信号较弱,失去数据准确性。

表 1 定距测量误差分析

实验值/mm	测量值/mm	误差/mm	相对误差/%
20	19.80	-0.20	-1.0
1 000	1 003.00	+3.00	0.30
3 000	2 998.50	-1.50	-0.05
4 000	3 998.50	+1.50	-0.04
5 000	5 006.30	+6.30	0.13
6 000	5 980.80	-19.20	-0.32
8 000	7 996.50	-3.50	-0.04
12 000	11 977.85	-22.15	-0.18
13 400	13 367.50	-46.50	-0.24
15 000	信号弱,舍弃		

4.1.2 移动测量数据矫正及其误差分析

假设在扫描过程中扫描面发生倾斜,那么在截取的所有点云中选取相对于雷达中心点(即激光发射点)所在的点 X、Y 轴倾斜角度为 0 的某一个(或一段)点云,与雷达中心点共同组成一个基准水平面(即与被扫描空间在同一水平面),利用每个点云所记录的距离 l_1 、倾角 α 等信息,由三角函数关系计算 $l_2 = l_1 \times \cos\alpha$ 求出该点云在基准水平面上的长度 l_2 ,对所有点云执行该操作,即可得到被扫描房间的长宽数据,如图 3 黑

线框所示,完成扫描测量后可运用计算式对所有点云距离进行矫正计算得到实际距离数据。

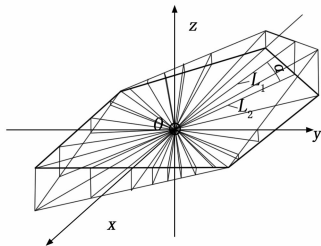


图 3 基准水平面求取

4.1.3 随机房间测量

单线激光雷达逐点扫描二维平面内的障碍物信息,并记录每个扫描点的距离和角度信息^[24],为验证本文方案的实际使用效果,随机选取两个无物体遮挡的长方体房间进行测试对比,其原始测量数据和矫正后数据曲线如图 4 所示。对扫描测量数据进行倾角矫正前后数据对比如图 4 所示,对比分析数据得到测量值与矫正值最大偏差为 44.2 mm,测量值和矫正后得到的尺寸与实际尺寸的最大偏差分别为 23.9 mm 和 18.2 mm。

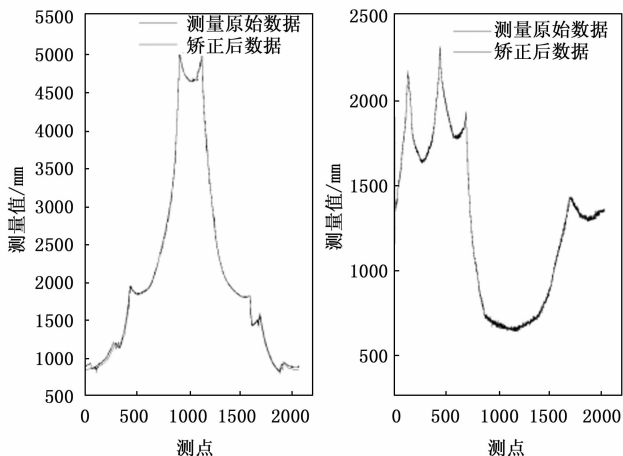


图 4 数据矫正误差

4.2 建筑空间模型构建

利用测量终端对房间进行横、纵向各一次环切扫描测量获得建筑单个空间水平和竖直方向上的点云数据,经过矫正、拟合后求得建筑长、宽、高的尺寸信息,根据室内特征轮廓线,运用布尔交集运算规则分别将室内特征轮廓线进行横纵向拉伸,接入已有建模软件,实现“切环点云—切环线—空间体”的模型生成,构建建筑房间单个内部空间体。

构建建筑单个内部空间体后,根据扫描时姿态角度测量传感器获取到的该空间体的相对扫描初始坐标点的空间坐标,以横向环切扫描点云数据的扫描零时的坐标为该空间体的坐标,通过向量描述该空间体的姿态并赋

予该空间体所在楼层、方位等属性,标识其在扫描坐标系里的坐标,生成含楼层、方位属性标识的建筑单个内部空间体。

在此基础上,以建筑内部空间门窗洞口的特征点为向量对正基准,结合建筑设计及建造中通讯规则,依次将对应不同坐标点上的多个方位内部空间体放置于测量系统坐标系相应的位置,建立基于扫描设备坐标系的建筑单个内部空间体的初步建筑空间模型,此空间模型中各空间体彼此分割并没有有效联结。对于拼接后多个空间体之间的间隙,结合建筑墙体等构件的“模数设计”等规则,利用墙、柱、梁等内部构件的自动填充计算方法,填充间隙生成建筑完整空间体。

现有激光扫描测量绘制平立面图的方法,一是受设备精度影响,另一方面是受绘图软件功能和操作人员的技能水平的影响。与参考文献以及传统测量方法相比,本文提出的激光雷达测量系统在测量精度上略低于三维激光扫描测量精度,但点云数量相较于三维激光扫描测量减少了 95% 以上,处理速度更快;与现有单线激光雷达扫描测量系统相比,数据处理速度相当,其多采用类似于架站式的定点方式采集距离信息,其在测量时未受到抖动或抖动影响更小,因此本文所提的手持式测量系统不同在精度与其尚有一定差距。

5 结束语

基于主控芯片模组的软硬件开发技术,提出一种集测距、绘图功能一体化的手持式单线激光雷达的建筑内部空间尺寸扫描测量系统。该扫描测量系统通过旋转矩阵矫正获得能完整表述建筑内部尺寸、方位信息的切环点云数据,结合最小二乘法和建筑建造通讯规则,提出点云数据直线拟合方法和门、窗、梁、柱等构件的识别方法于一体的建筑平剖面绘制方法,并运用布尔交集运算规则生成单个空间体并由此拼接构建楼层和整栋建筑空间体。利用所开发的扫描测量系统对某建筑内部空间进行了试验,在雷达测量半径范围内系统定点测量数据误差范围为 ± 22.2 mm,各测量区间的相对误差均不大于 0.5%;当手持测量装置时的测量数据单向误差范围为 0~23.9 mm,各测量区间的相对误差均不大于 0.7%,相对于定点测量误差增加 7.7%,手持测量系统所测数据经过倾角矫正后的误差为 18.2 mm。通过大量试验证明该扫描测量系统及其扫描方法在测量异形、多边形建筑空间中有着较高的精度和优异的平剖面图绘制效果,可以大幅提升既有建筑平面图的绘制效率。受限于激光雷达本身性能的影响,建议在测量过程中尽量保持测量终端处于相对稳定的状态或选择精度更高的激光雷达,更有利于提高测量数据的准确性;扫描过程应

(下转第 28 页)