

图7 扫描区域示意图

单次扫描得到的距离信息是激光雷达中心到物体上表面某点的径向距离, 需要根据角度与距离之间的关系得出物体上表面该点的高度信息, 计算公式为:

$$h_i = l_i \cdot \cos \theta_i \quad (1)$$

同一扇形截面相邻两点之间的距离可以通过距离信息和激光扫描仪的角度分辨率求得, 计算公式为:

$$d_i = h_i \cdot (\tan \theta_i - \tan(\theta_i - \alpha)) \quad (2)$$

相邻扇形之间的间距根据扫描仪的运行速度可以求出. 其中, l_1, l_2, \dots, l_n 表示测量点到激光扫描仪的径向距离, h_1, h_2, \dots, h_n 表示测量点到激光扫描仪所在水平面的垂直距离, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 表示测量点与激光扫描仪中心的偏移角度, α 表示激光扫描仪的角分辨率, d_1, \dots, d_{n-1} 表示同一扇形区域内相邻两测量点之间的间距. 物体体积计算公式为:

$$V = \sum_i^{n-1} (h_i - H_i) \cdot d_i \cdot w_i \quad (3)$$

其中, w 代表相邻两个扇形之间的间距.

3 系统的实现与测试

该系统主要由测量管理与控制、测量场景重绘和数据采集与体积计算等功能构成. 首先介绍测量管理与控制的流程, 并展示测量场景的重绘效果; 然后针对不同的货物摆放方式, 设计了几组试验, 用于验证该系统的测量精度; 最后, 对于试验中发现的问题予以分析.

3.1 界面与软件流程

软件的整体控制流程图如图8所示. 根据系统功能需求设计软件界面和所需要的输入与输出接口, 软件界面如图9所示. 其中, “扫描”、“结束”、“撤销”和“图像”4个按钮用于用户对本系统下达控制命令; 体积用于显示测量所得物体体积; 提示信息用于显示当前系统所处的状态.

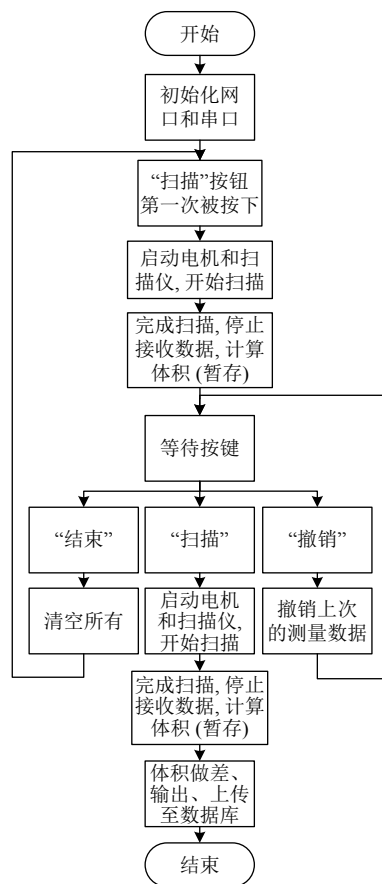


图8 软件流程图



图9 软件界面

在扫描过程中使用了多媒体定时器采集数据. 这样做的好处是, 在接收激光扫描仪发送给主机的信息时, 同时可以响应操作界面产生的新的事件, 使得在扫描过程中撤销或者结束当前扫描的指令可以被执行; 多媒体定时器的定时精度更高, 使得系统能够以严格的时间间隔采集数据. 考虑到激光扫描仪最大的扫描频率可以达到 50 Hz, 即每 20 ms 完成一个扇形截面区域的扫描, 所以将多媒体定时器设置为每 20 ms 请求一次测量数据.

图形重绘功能借助 Matlab 强大的图形处理能力得以实现. 使用激光扫描仪采集得到的点云信息, 完成对被测物体的三维图像绘制. 首先在 Matlab 编辑器中编写用于重绘的函数, 函数流程如图 10 所示.

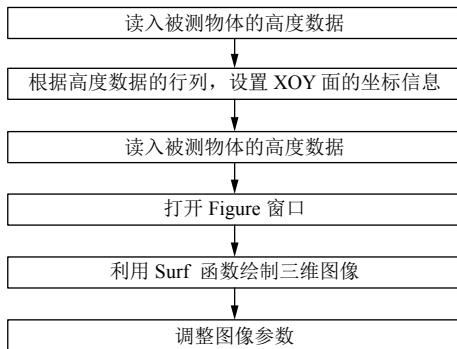


图 10 图形重绘函数流程图

为了使 C++ 程序可以方便地调用这段代码, 使用 Matlab 所提供的 Deployment Tool 工具将 .m 文件编译为 Windows 可执行文件, 即 .exe 文件. 图形重绘的实现效果如图 11 所示.

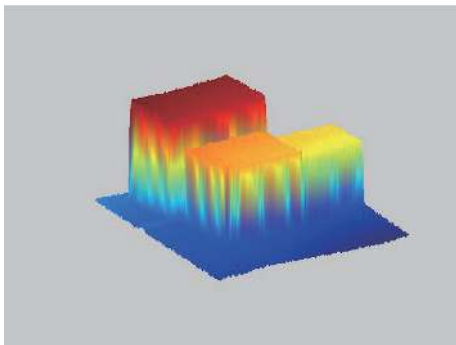


图 11 三维重建立体图

3.2 对比试验

(1) 物体大小对于测量结果的影响

首先对少量物体的总体积进行测量, 随后再逐渐增加被测物体的数量. 需要注意的是, 所有货物均摆放在激光扫描仪扫描轨道的正下方, 以避免因为货物摆放位置的不同而影响试验测试结果; 同时, 为了避免摆放方式不同可能造成的测量误差, 所有货物均平行摆放于同一平面. 试验结果如表 1 所示.

表 1 对比试验 1 的测量结果

样本	理论值 (m ³)	扫描值 (m ³)	误差
样本 1	1.03	1.026	0.004(0.39%)
样本 2	1.545	1.55	0.005(0.32%)
样本 3	2.575	2.588	0.013(0.50%)

(2) 货物是否规则摆放对于测量结果的影响

在实际测量中, 货物之间可能并没有全部都摆放整齐, 从俯视角度看可能会出现如图 12 的摆放情况.

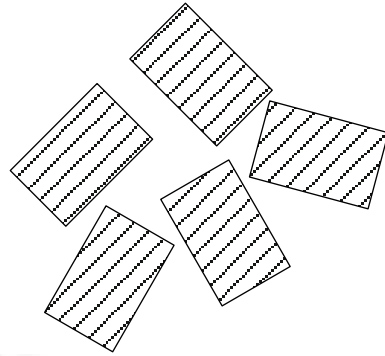


图 12 不规则摆放货物示意图

设计对比试验来测试在这种情况下对货物进行体积扫描所造成的误差是否较大. 首先将货物平行摆放于地面进行体积测量, 再移动货物使其之间的角度为任意值, 对其进行扫描, 得到的测试数据如表 2 所示.

表 2 对比试验 2 的测量结果

样本	理论值 (m ³)	扫描值 (m ³)	误差
平行摆放的 5 个周转箱	0.515	0.52	0.005(0.97%)
任意摆放的 5 个周转箱	0.515	0.524	0.009(1.75%)

(3) 堆叠摆放方式对测量结果的影响

当货物较多或者货物较大时, 为了能一次性的测量更多的货物的体积, 加快测量效率, 往往需要将货物堆叠摆放. 但是在堆叠摆放过程中, 可能出现上下两层货物摆放并没有完全对齐的情况, 如图 13 所示.

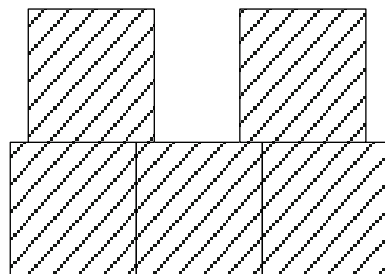


图 13 两层货物未对齐摆放的示意图

针对这种情况本文设计了对比试验, 分别测量上层货物与下层货物对齐摆放的情况和上层货物较下层货物摆放更加紧密的情况, 测试数据如表 3 所示.

表3 对比试验3的测量结果

样本	理论值(m ³)	扫描值(m ³)	误差
对齐摆放的两层货物	2.06	2.074	0.014(0.68%)
未对齐摆放的两层货物	2.06	1.97	0.09(4.37%)

(4) 试验结果分析

通过对以上各试验的分析,得到如下的一些结论:

1) 对比试验 1 说明: 无论被测物体体积较大还是较小, 测量的总体误差都可以控制在 1% 以内;

2) 对比试验 2 说明: 虽然对不规则摆放的物体进行扫描时会造成比扫描规则摆放物体更大的误差, 但是扫描的整体误差还是处于可控制的范围之内, 总体误差小于 2%, 因此说明此系统可以运用于对摆放不规则的物体进行体积扫描;

3) 对比试验 3 说明: 在测量堆叠货物时, 货物摆放要尽量边缘对齐, 造成误差的主要原因是光线沿直线传波, 较高的货物旁边将会出现“扫描盲区”, 如图 14 所示, 使得处在盲区中的货物没有被扫描到, 导致扫描的体积数据偏小; 即使如此, 造成的整体误差仍然低于 5%, 说明系统仍然可以适用于此种情况。

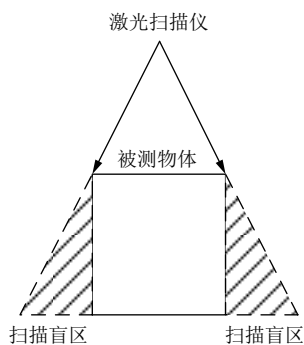


图 14 扫描盲区示意图

4 总结

本文设计并实现了一套基于激光扫描仪的物体体积测量系统的软件程序, 该系统满足了所设计的功能需求: 在高度为 5 至 6 m 的位置, 以约 0.5 m/s 的速度完成对被测物体体积的扫描, 整体误差可以控制在 5% 以下; 测量得到的体积数据可以准确的传输至服务

器; 软件界面可视化, 而且可以通过对扫描数据的三维重建直观的观察所扫过区域的情况。本文设计的体积测量系统适用性更强, 可以测量扫描区域中物体的总体积, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- 姜志华. 基于激光扫描的堆料体积测量系统研究与设计 [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- Zhang DJ, Li BJ, He L. Application on laser measurement for large storage yard based on multi-sensor integration. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0208005. [doi: 10.3788/CJL201239.0208005]
- Wang J, Cai CQ, Zhang Y, *et al.* Investigation on measurement method of weight volume based on acoustics. *Advanced Materials Research*, 2012, 487: 816–820. [doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.487.816]
- Kobata T, Ueki M, Ooiwa A, *et al.* Measurement of the volume of weights using an acoustic volumeter and the reliability of such measurement. *Metrologia*, 2004, 41(2): S75–S83. [doi: 10.1088/0026-1394/41/2/S08]
- Siswanto J, Prabuwo AS, Abdulah A. Volume measurement of food product with irregular shape using computer vision and Monte Carlo method: A framework. *Procedia Technology*, 2013, 11: 764–770. [doi: 10.1016/j.protecy.2013.12.256]
- 丁为民, 赵思琪, 赵三琴, 等. 基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 1–10, 20.
- 李萍. 基于机器视觉的散状物料动态计量系统研究 [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2017.
- 毛佳红, 娄小平, 李伟仙, 等. 基于线结构光的双目三维体积测量系统. *光学技术*, 2016, 42(1): 10–15.
- 邢冀川, 罗小红. 利用激光三角法测量货车车厢体积. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3083–3087. [doi: 10.3969/j.issn.1007-2276.2012.11.042]
- Fredriksson I, Larsson M, Strömberg T. Measurement depth and volume in laser Doppler flowmetry. *Microvascular Research*, 2009, 78(1): 4–13. [doi: 10.1016/j.mvr.2009.02.008]
- 周峰. 基于三维激光扫描技术的仓储散粮堆体积测量系统研究 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.