

文章编号: 1672-8785(2015)11-0030-06

用于采集交通数据的激光 扫描器技术研究

张 伟^{1,2} 吴 限²

(1. 北京交通大学, 北京 100044;

2. 北京握奇数据系统有限公司, 北京 100102)

摘 要: 针对交通数据采集应用, 设计了一种符合一级激光安全等级的中短距离、高速、高精度脉冲激光扫描器 (Laser Scanner)。为了解决激光扫描器的快速、高精度测距问题, 提出了一种数字化全波形脉冲检波方法。该方法通过脉冲波形前沿拟合判定激光脉冲的达到时刻, 以模拟数字转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 的采样时钟作为计数器, 对回波延时进行计算; 再根据回波信号的强度对测距结果进行补偿修正, 显著减小了测距幅相误差。扫描器的信号处理基于高速 ADC 和 FPGA 实现。测试结果显示, 激光扫描器的测距频率达到 50000 点/s, 单点测距精度为 ± 4 cm, 能够满足车型自动分类、交通流量调查和客流密度检测等系统的数据采集需求。

关键词: 交通数据采集; 激光扫描器; 数字化全波形脉冲检波方法

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.11.006

Research on Laser Scanner Techniques for Traffic Data Collection

ZHANG Wei^{1,2}, WU Xian²

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Watchdata System Co. Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: A medium and short distance, high speed and high precision pulse laser scanner which meets the first level of laser safety is designed for traffic data collection. To solve the problem of the laser scanner in rapid and high precision ranging, a digital full waveform pulse detecting method is proposed. The method judges the arriving time of the laser pulse by fitting the front edge of the laser pulse waveform. Taking the sampling clock of an Analog Digital Converter (ADC) as a counter, the delay of the laser echo signal is calculated. Then, according to the intensity of the laser echo signal, the ranging result is compensated. Thus, the Walk error is reduced greatly. The signal processing of the laser scanner is implemented on the basis of the high speed ADC and FPGA. The test results show that the laser scanner has its ranging frequency of 50000 points/s and its single point measuring precision is ± 4 cm. It can meet the data collection requirements of automatic vehicle recognition, traffic flow investigation and passenger density detection.

Key words: traffic data collection; laser scanner; digital full waveform pulse detecting method

收稿日期: 2015-10-14

作者简介: 张伟 (1984-), 男, 北京人, 博士, 高级工程师, 主要从事光电传感技术研究工作。

E-mail: wd@watchdata.com

0 引言

激光扫描器自问世以来,已被广泛应用于航天、军事领域。近些年,随着技术的普及和成本的降低,激光扫描器正快速地向民用、商用方面拓展,在交通信息监测、汽车自动驾驶、工业自动控制和区域安全监控等领域发挥重要作用。作为关键的数据采集设备,激光扫描器能够准确探测车辆的位置、运动状态和轮廓外形,在智能交通领域中具有广阔的应用前景。

交通应用要求激光扫描器能够对运动中的车辆、行人进行测量。为了能够准确识别快速运动目标的状态、轮廓,激光扫描器的测距频率要达到每秒数万次,测距精度要达到厘米量级,发射的激光光束要满足一级安全激光等级,即不能对人眼造成伤害。交通系统通常需要设置大量的数据采集点,因此对激光扫描器的成本以及小型化提出了严格的要求。综上所述,交通数据采集应用需要一种中短距离、高速(每秒数万次测距)、较高精度(厘米级精度)、符合一级激光安全的小型化、低成本激光扫描器。

1 激光扫描器的原理

激光测距方法可以分为脉冲法、相位法和 FMCW(调频连续波)等^[1]。与其他方法相比,脉冲式激光测距具有结构简单、测程远、测量速度快等优点。脉冲法是通过测量激光脉冲的飞行时间(Time-of-Flight, TOF)实现对目标物位置的精确探测的。具体过程是,激光扫描器发射一束激光,遇到目标物后部分能量返回,形成激光回波,回波被激光接收模块接收。在这一过程中,需要测量激光的发射时刻 T_{start} 与回波的接收时刻 T_{stop} 之间的时间间隔,然后再计算激光器到目标物间的距离^[2]:

$$D = \frac{c}{2} \times (T_{Stop} - T_{Start}) \quad (1)$$

由式(1)可知,1 cm 距离对应 66.7 ps 的时间间隔。若要实现厘米级的测距精度,就需要实现亚纳秒精度的时间测量。因此,快速、高精度的脉冲时间间隔测量是激光扫描测距系统的关键技术之一。本文提出一种数字全波形脉冲时间间隔测量方法,该方法采用高速 ADC(大于

1 Gsps 采样速率)对发射脉冲和回波脉冲进行采样量化;然后,采用数字信号处理方法通过脉冲前沿拟合与回波能量补偿修正等方法精确计算发射脉冲与回波脉冲的时间间隔。

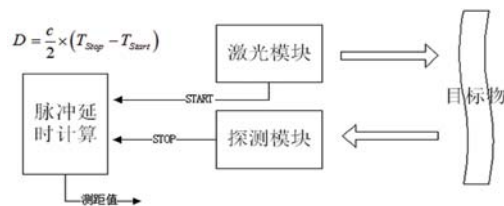


图 1 脉冲激光测距原理

2 激光扫描的控制与实现

激光扫描的具体过程是在特定时刻连续地发射激光脉冲,激光脉冲到达高速旋转的反射镜面后,被反射到各个特定方向,从而形成一个二维扫描区域。为了使反射后的激光的发射角度均匀、固定,必须保证高速旋转反射镜的旋转角度与激光的发射时刻严格同步。

激光扫描的工作原理和时序如图 2 和图 3 所示。首先, FPGA 主板通过 PWM(脉冲调制)信号控制电机匀速旋转。电机、旋转扫描镜与码盘同轴,当扫描镜旋转的角度增量达到 $\Delta\theta$ 时,码盘会向 FPGA 主板发出一个脉冲方波;FPGA 主板根据此信号生成激光发射驱动信号,以触发激光的发射。激光发射的同时,发射模块中的光电二极管(Photo Diode, PD)会产生激光发射基准信号 T_{start} ,它是回波延时的计算基准;激光遇到目标物后产生激光回波,再经接收模块的光电变换、放大、滤波和量化等预处理,便得到回波信号 T_{stop} ;FPGA 主板运行激光回波检测算法,计算并保存目标距离。以上为一个测距点的测量过程。当码盘继续旋转,角度增量再次达到 $\Delta\theta$ 后,再次触发激光发射,进行下一个点的测距。

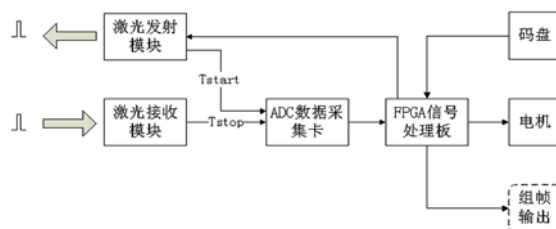


图 2 激光扫描器的结构与工作原理

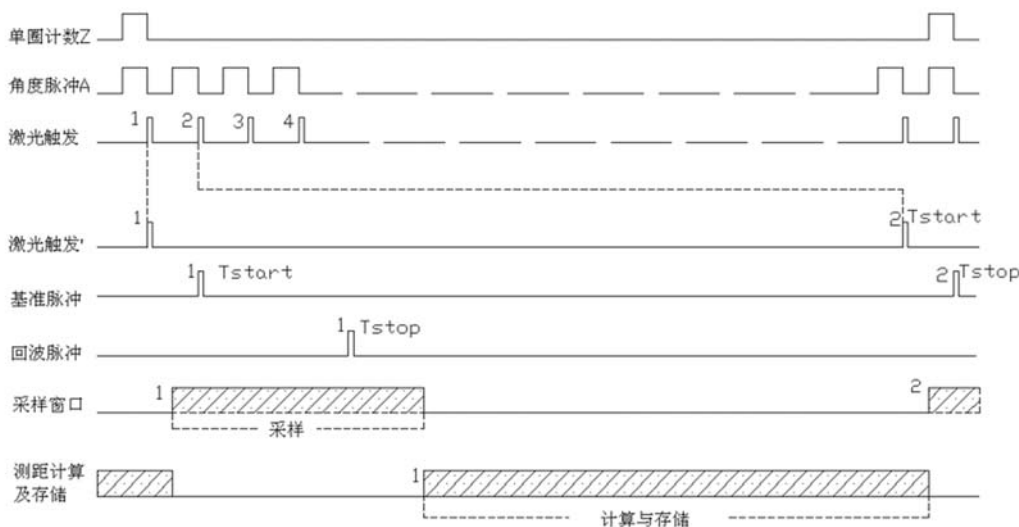


图 3 激光扫描器的工作时序

码盘采用 1000 线的单圈绝对码盘，有 A、Z 两路信号输出。A 信号是角度变化信号，码盘每旋转 0.36° 就会生成一个脉冲方波。Z 信号是单圈计数信号，码盘每旋转 1 圈就生成一个脉冲方波。当 FPGA 检测到 Z 信号时，表示码盘已经旋转了 1 圈，按正常工作流程，系统已经发射了 1000 个激光脉冲，并存储了 1000 个点的测距值。此时，FPGA 将对这些存储数据进行组帧，并经以太网口通过 TCP/IP 协议将它们输出到外部设备。

3 激光脉冲信号数字检波方法

3.1 数字检波方法的原理

对于高速（每秒几万个测距点）、高精度（厘米量级的测距精度）的测距应用，一些传统的脉冲检波方法及电路难以达到理想效果，如用于压缩信号动态范围的自动增益控制 AGC 电路，其反馈控制的稳定时间大于激光扫描器的单点激光测距的信号处理时间（微秒量级），因此无法根据激光回波的强度自动调整信号放大增益。另外，目标物距离、反射率、反射角度的变换都会造成接收回波能量的剧烈变化，由此引起回波信号的幅度变化，从而导致幅相误差，或称为“行走误差”（Walk Error），这会直接增大测距

误差^[3]。另一方面，为了提高测距精度，一般常采用多次测量法，如对 N 次测量取平均可使测量精度提高 $\sqrt{N}$ 倍^[4]。而激光扫描器的测距速度很快，受半导体激光器重复频率和一级安全激光能量等级的限制，不可能通过统计测量的方法来提高单点测距精度。

为了实现高速、高精度的回波检测，本文采用一种数字化检波方法。其检波原理是采用回波脉冲前沿的多点阈值代替单点阈值进行回波时刻判定和回波延时计算，即将点到点的时延测量转变成波形前沿的时延测量，判定阈值点由 1 个增加到多个，提高了测量精度。回波脉冲的上升沿（10%~90% 前沿）的线性拟合度大于 98%，因此可以对前沿进行直线拟合。用拟合的直线代替波形前沿可以提高处理速度和降低数据处理的难度。

具体地讲，数字化检波的流程包括脉冲前沿的提取、前沿时刻的鉴别、回波延时的计算和测距误差的修正等几个步骤。脉冲前沿提取就是提取回波的前沿，此处采用斜率极值滑动检索的定位方法，即计算相邻 N 个点的斜率，然后滑动窗口进行检索，得到斜率最大的一组数据，以此组数据代替脉冲前沿。时刻鉴别是确定脉冲的时间位置，对提取的波形前沿数据做直线

拟合, 拟合直线的中值点位置即为脉冲到达时刻。在分别计算出基准波 T_{start} 和回波 T_{stop} 的达到时刻后便可以根据回波延时 T_{stop} 与 T_{start} 之差计算出目标的距离。

以图 4 为例, 激光脉冲的宽度为 10 ns, 采样速度为 1.5 Gsps, 以连续的 6 点数组作为前沿提取的检索窗口, 并对提取的前沿波形进行直线拟合, 拟合线段的中心时刻即为 T_{start} 和 T_{stop} , 目标的距离便可以通过式 (1) 得到。

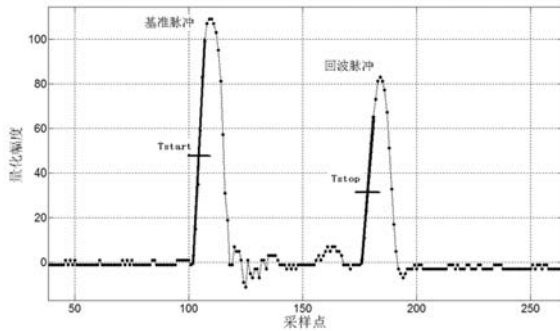


图 4 激光基准与激光回波的前沿提取、时刻鉴别

3.2 数字化检波的误差分析

一般的脉冲式激光测距系统的测距误差包含幅相误差、时间间隔测量误差、阈值鉴别芯片的输出抖动误差和时刻鉴别抖动误差等^[2]。与模拟脉冲检波方法不同, 数字化检波方法采用高速 ADC 代替时间间隔测量芯片和阈值鉴别芯片。因此, 数字检波的测距误差可以分为幅相误差、时刻鉴别误差和 ADC 采样随机误差 (原理上类似于时间间隔测量误差)。

3.2.1 幅相误差

幅相误差是由回波信号的幅度变化造成的。在时刻鉴别阈值固定的情况下, 回波幅度的变化会导致回波信号达到阈值的时刻发生变化, 从而导致测距误差。幅相误差与时刻鉴别方法直接相关, 如前沿鉴别法采用固定阈值判定脉冲的到达时刻, 其对幅相误差基本没有抑制作用。而双阈值鉴别^[5]、恒定比值鉴别、高通容阻鉴别和信号质心检测等方法能够有效减小幅相误差^[3]。对于数字化检波方法, 可采用脉冲前沿多点拟合的方法确定脉冲的到达时刻,

该方法是一种多阈值时刻鉴别技术, 在脉冲波形不失真的情况下, 对测距的幅相误差具有很强的抑制作用。

3.2.2 时刻鉴别误差

产生时刻鉴别抖动误差的原因在于接收到的脉冲信号上叠加了噪声^[2]。当激光测距仪采用前沿鉴别方式进行时刻鉴别时, 脉冲上升沿上叠加的噪声会使其穿越比较阈值的时间发生变化, 由此产生时间的抖动, 并带来测量误差。

对于高斯型激光脉冲, 前沿鉴别抖动误差的标准差可以表示为^[2]

$$\sigma = \frac{t_r}{\sqrt{2}(SNR)} \times \frac{c}{2} \quad (2)$$

式中, t_r 为脉冲上升时间, SNR 为信号信噪比, c 为光速。对于 N 点拟合的时刻鉴别方法, 其实质相当于多次测量的统计平均, 其标准偏差可以表示为

$$\sigma' = \frac{t_r}{\sqrt{2}(SNR)} \times \frac{c}{2\sqrt{N}} \quad (3)$$

式中, 前沿采样点个数 N 可以近似表示为脉冲上升时间 t_r 与采样速率 SR 的乘积。于是得到

$$\sigma' = \frac{\sqrt{t_r}}{\sqrt{2}(SNR)} \times \frac{c}{2\sqrt{SR}} \quad (4)$$

根据式 (4), 脉冲的上升时间越短, 信噪比越高, 采样速率越高, 时刻鉴别误差就越小。

3.2.3 采样位置随机误差

由于无法实现 ADC 采样与激光脉冲的时间同步, 采样点在激光脉冲波形上的位置具有随机性, 且脉冲波形在两个采样点之间的任意位置概率相同, 在误差机理上类似于模拟检波方法中的时间间隔测量误差^[2]。于是由采样位置的随机性所导致的测距均方根误差可以表示为

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{3} \times SR} \times \sqrt{2} \quad (5)$$

式中, SR 为采样速率, C 为光速。对于采样速率为 1.5 Gsps 的 ADC, 其对应的均方根测距误差为 4 cm。根据式 (5), 通过提高 ADC 采样速率可以减小采样的随机误差。在不提高硬件成本的情况下, 可以采用插值算法对脉冲波形进行

数据插值, 然后对插值后的脉冲波形进行检波分析, 这样可以大幅减小采样的随机误差。

3.3 实验验证与测距修正

以波长为 905 nm、峰值功率为 40 W, 脉冲宽度为 10 ns 的半导体激光器作为激光光源, 硅基雪崩探测器 (Avalanche Photo Diode, APD) 及前置低噪声放大器作为激光接收模块, 采用采样速率为 1.5 Gsps、采样精度为 7 bit 的 ADC 和 FPGA 进行采样量化和数值计算。用固定的目标距离进行测距实验, 多次测量得到的测距标准差为 1.22 cm, 即单点测距精度为 ± 3.6 cm(三个标准差)。

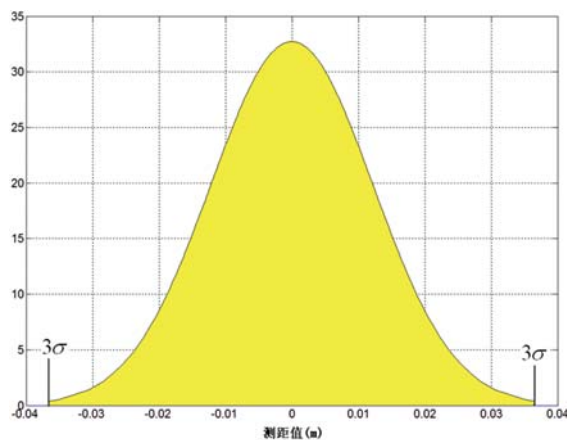


图 5 测距结果的统计分布

实际应用中, 激光回波能量的动态范围可能大于 4 个数量级, 因此有必要进行不同回波能量的对比测试。当脉冲回波能量较大时, APD 会发生脉冲展宽现象, 因此可以采用脉冲的半波宽度作为回波能量的标定。如图 6 所示, 当脉冲的半波宽度小于 5 ns 即信号未发生饱和时, 测距值基本恒定, 说明数字检波方法对于非饱和信号的幅相误差具有较好的抑制作用。但当脉冲半波宽度大于 5 ns 时, 脉冲波形会发生饱和和非线性失真, 测距误差显著增大, 最大偏移误差接近 40 cm。因此, 对于饱和脉冲信号的非线性失真问题, 需要根据回波能量对测距结果进行数值修正。由于不能采用自动增益放大器 AGC 来压缩信号动态范围, 且受成本限制, 不可能采用高精度 (大于 12bit) 的高速 ADC。因此, 只能

采用脉冲波形分析方法, 根据脉冲宽度对回波能量进行标定; 然后, 通过标定结果对测距值进行修正补偿。如图 7 所示, 修正后的饱和信号测距值基本恒定, 由不同回波能量导致的幅相误差小于 ± 3 cm。

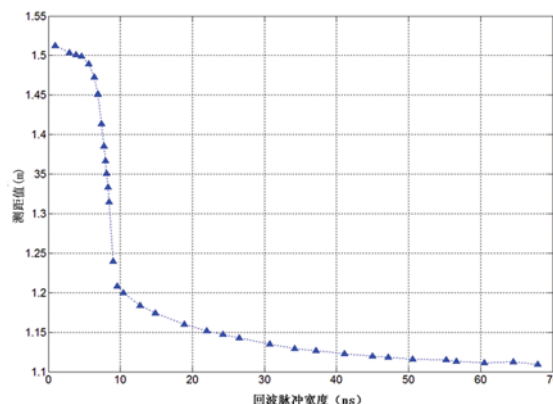


图 6 测距值随脉冲半波宽的变化

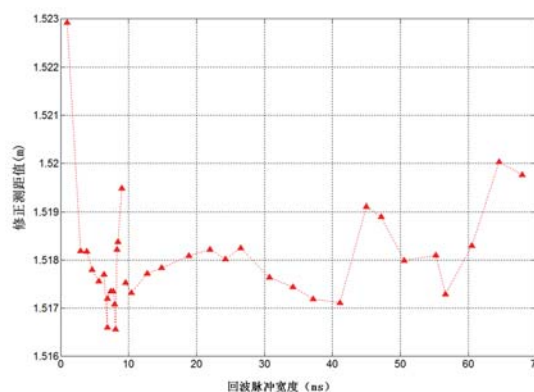


图 7 修正后的测距值随脉冲半波宽的变化

信号的信噪比对测距结果也有显著影响。在不同回波能量等级下计算测距结果的标准差后, 得到了测距标准差与回波信号量化幅度的关系, 如图 8 所示。可以看到, 测距标准差与信号量化幅度基本呈反比。这符合时刻鉴别误差公式

$$\sigma' = \frac{\sqrt{t_r}}{\sqrt{2}(SNR)} \times \frac{c}{2\sqrt{SR}} \quad (6)$$

式中, SNR 为信噪比。由于系统的主要噪声为 ADC 的量化噪声, 而且量化噪声恒定, 因此信号量化幅度越大, 信噪比越高, 测距标准差就越小。当回波能量较小时, 由于信噪比的降低会导

致测距误差增大, 因此在设计激光测距系统时应该尽量提高 ADC 采样量化前的信号增益。在成本允许的情况下, 可选择采样速率更高、精度更高的 ADC。

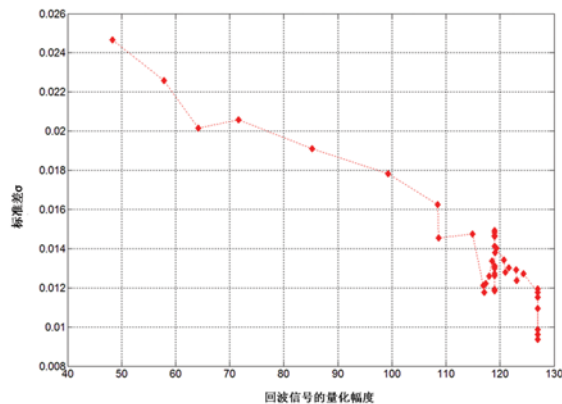


图 8 测距标准差与回波信号量化幅度的关系

此外, 脉冲回波展宽的原因有很多种, 如激光倾斜照射、多重回波叠加^[6]以及 APD 饱和效应^[7]等。此种测距补偿修正方法只适用于中、短距离的激光测距, 因为在近距离时光斑的尺寸较小, 可以忽略由于光斑倾斜或者多重回波叠加导致的脉冲展宽所带来的影响。在近距离测距时, 脉宽展宽以 APD 的饱和效应为主, 可以根据回波的宽度来标定回波的能量等级。

4 激光扫描器实测分析

激光扫描器的发射部分采用中心波长为 905 nm 的半导体激光二极管, 其峰值功率为 40 W, 脉冲宽度为 10 ns。接收模块采用附带 905 nm 窄带滤光片的硅基 APD 探测器, 接收光路与发射光路同轴。扫描速度为 50 圈/s, 激光重复频率为 50000 Hz, 角分辨率为 0.36°, 测距精度约为 ± 4 cm。半导体激光二极管和 APD 探测器对温度都很敏感。为了稳定扫描器的工作点, 发射模块集成了 TEC 温度控制; 接收端集成了温度补偿模块, 可根据温度变化对 APD 探测器的偏压进行补偿控制。在室外应用时, 为了消除太阳光的干扰, 需在 APD 前端加入波长为 905 nm 的窄带滤光片, 且 APD 探测器与前置放大器之间要采用交流耦合方式。

固定激光扫描器, 使目标物通过扫描截面, 得到的结果如图 9 和图 10 所示。可以看出, 激光扫描器达到了厘米级的测距精度和毫弧度级的角分辨率, 能够探测行人、车辆轮廓等目标, 能够完整地还原出目标轮廓。激光扫描器的具体性能参数见表 1。

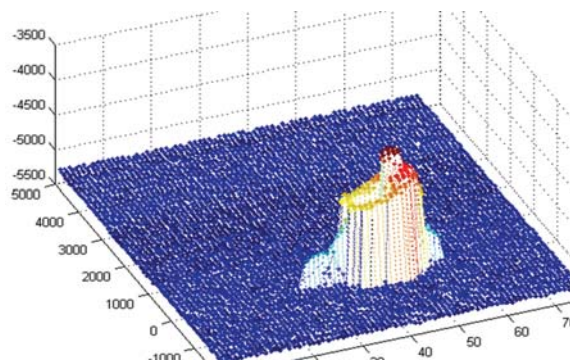


图 9 人骑自行车的轮廓扫描点云图像

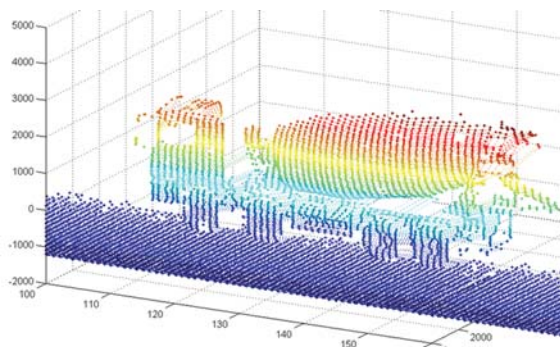


图 10 搅拌车的轮廓扫描点云图像

表 1 激光扫描器的性能参数

激光扫描器参数	
探测距离	0~30 m
角分辨率	0.36° (6.3 mrad)
测距精度	± 4 cm
扫描频率	50 Hz
扫描视场角	180°
激光器	905 nm 半导体激光二极管
激光安全等级	一级安全
峰值功率	40 W
重复频率	50 kHz
激光发散角	0.7 mrad
传输接口	10 M/100 M 以太网口
传输协议	TCP/IP
数据传输速率	100 kB

(下转第 40 页)