

文章编号:1671-8879(2016)04-0009-09

# 基于线结构光的沥青路面三维数据采集系统

孙朝云,呼延菊,李 伟,魏子尧,刘 祝

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对目前沥青路面表面形貌三维数据采集实时性差、精确度低,难以准确全面地提供路面三维构造形态的问题,研究了基于线结构光的沥青路面表面形貌三维数据采集系统。该系统是针对中国道路三维信息检测要求而研发设计的集光、电一体化和自动化的三维检测设备,可以完成对待测沥青路面表面形貌数据的采集、分析、处理、三维显示等。系统采用红外线阵激光光源、面阵 CCD 相机及数字图像检测技术,根据激光三角法计算出路面表面的三维深度信息,并利用 MATLAB 软件实现路面形貌的三维重构,获得了重构后的路面形貌三维显示,并进行了检测结果的定量分析。系统基于模块化设计,主要由电源模块、下位机控制模块、计数触发模块、激光三角检测模块、GPS 定位模块、数据处理模块组成,通过测试软件驱动硬件模块,从而获得沥青路面三维数据的采集。研究结果表明:模块化设计提高了系统的抗干扰性,使系统结构简单清晰,免去了复杂的连线,便于调试、维修,缩短了开发周期,降低了开发、维护的成本;室内外试验测试分析同时表明,系统性能稳定,满足现场检测的要求,能够满足沥青路面表面形貌三维数据采集要求,并可以提供形象直观的路面表面三维形貌。

**关键词:**道路工程;线结构光;沥青路面;三维数据

**中图分类号:**U416.04

**文献标志码:**A

## Asphalt pavement surface 3D data acquisition system based on line-structure light

SUN Zhao-yun, HUYAN Ju, LI Wei, WEI Zi-yao, LIU Zhu

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To solve the problem of poor real-time, low accuracy of current asphalt pavement surface 3D data acquisition system, which can not provide 3D pavement data comprehensively, this paper studied an asphalt pavement 3D data acquisition system based on line-structure light. The system was a three-dimensional equipment with optical and electrical integration and automation, which was designed for domestic road three-dimensional information detection. It could realize data collection, analysis, processing, 3D display for asphalt pavement surface topography. The system used infrared laser light source, planar array CCD camera and digital image detection technology. This system computed the 3D depth information based on laser triangulation algorithm, finished 3D reconstruction of road surface morphology by use of

收稿日期:2016-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51408045);陕西省青年科技新星项目(2013kjxx-93);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G3242007)

作者简介:孙朝云(1962-),女,安徽太和人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhaoyunsun@126.com。

MATLAB software to obtain 3D display after reconstruction, and did quantitative analysis of detection results. Based on modular design, this system mainly consisted of power supply module, slave computer control module, counting trigger module, laser triangulation detection module, GPS module and data processing module. The 3D data of asphalt pavement were obtained through testing software's driving hardware modules. The results show that modular design improves anti-interference, making the system structure simple and clear, and relieve from the complex wires. It is convenient for debugging, maintenance, shorten development cycle, and the cost for development and maintenance is also reduced. The results also show that the system can not only meet the requirements of asphalt pavement 3D data acquisition and the requirements of real-time detection, but also provide vivid and visualized 3D visual topography. 17 figs, 21 refs.

**Key words:** road engineering; line-structure light; asphalt pavement; 3D data

## 0 引言

沥青路面纹理综合反映了沥青路面表面的宏观以及微观构造,对研究沥青路面性能具有重大的现实意义<sup>[1]</sup>。目前,国内外检测沥青路面纹理的方法总体分为间接检测法和直接采集法。间接检测法主要有摆式摩擦仪法、体积法和溢流时间法,均不能形象直观地反映路面表面形貌特点;直接采集法主要基于激光位移传感器、光学成像等方法。

国内外研究机构利用激光位移传感器,研发了大量路面纹理检测仪,如丹麦 Green Wood 工程公司的 GW 高速路面纹理检测仪和日本的环形路面纹理检测仪 CTM,这些检测仪不能获得路面表面的精确三维形貌<sup>[2]</sup>。随着三维成像技术的发展以及对三维重构技术研究的迫切需要,基于三维重构技术的道路表面破损检测、路貌空间模型的重构等技术,科技人员进行了大量研究,取得了丰硕成果。中国的代表性成果有很多,如笔者使用的以三维数据采集面阵相机为核心的数据采集系统,实现了基于 OpenGL 的路面三维重构技术,并结合激光三角测距技术,深入分析研究结构光的优良性能,从而实现了基于结构光的路面三维重构技术,进一步推进了该方面研究的进展<sup>[3-4]</sup>;马荣贵等结合地理信息系统(GPS)相关技术实践,深入分析了道路横断面车辙数据特点,并在此基础上研究出了相应的三维路面重构技术<sup>[5]</sup>;邹丽琼等针对沥青路面微观纹理形态当下检测技术中存在的缺陷,提出以微观视觉技术为依托的沥青路面三维重构技术<sup>[6]</sup>;鲁植雄等致力于构建与原始道路表面相同或者相似的道路表面谱图,从而基

于分形技术理论,研究了分形插值算法的路面三维重构方法<sup>[7]</sup>;李鹏飞等在从车辆动力学角度分析行驶车辆对道路要求的基础上,研究了三维虚拟路面的谐波重构技术,其研究成果不仅促进了路表三维重构技术的进一步发展,同时为车辆动力学仿真提供了符合实践需要的可靠输入<sup>[8]</sup>。

鉴于实际需要,国内外部分学者对路表轮廓重构技术也进行了相应研究,代表性的有 Vilaca 等于 2009 年对基于激光三角法的路表轮廓三维重构系统进行了研究,并开发了相应的路表三维轮廓 3D 数据获取系统,并于 2010 年采用沥青试件对装置性能进行了试验综合分析<sup>[9-11]</sup>;2014 年,Lei 等利用光度立体技术(photometric stereo techniques)进行了路表轮廓的三维重构研究,但是该方法对于路表重构的精度有待进一步提高<sup>[12]</sup>;Slimane 等利用立体光度成像法,检测出路面微观三维形貌,但该方法不适于现场检测<sup>[13]</sup>;Khoudeir 等利用固定光照条件下的灰度图像恢复路面三维宏观形貌,该方法忽略了沥青路面的色彩信息,有待进一步改进<sup>[14]</sup>;王端宜等利用普通数码相机拍摄沥青路面数字灰度图片,根据单张图片灰度值恢复沥青路面三维宏观形貌,但没有考虑外界光照条件变化和沥青路面的色彩影响<sup>[15]</sup>;王晓嘉等对激光三角法的基本原理以及研究现状进行了研究,详细分析了激光三角法目前的研究现状以及发展趋势<sup>[16]</sup>;唐磊等通过分析三维曲面的曲率特征,对基于路面图像三维地形模型的路面裂缝的三维检测进行了研究,检测到了大部分的路面裂缝,但是其算法复杂且没有获得广泛应用<sup>[17]</sup>;张肖宁等采用激光三角法测量技术对沥青粗集料的表面纹理进行了研究,进一步拓展了激光三角法的应用,同时为基于激光三角法进行路面

表面纹理的重构奠定了基础<sup>[18]</sup>。基于以上路表三维重构研究的现状以及存在问题,本文采用线结构光技术,研究开发了沥青路面表面三维形貌重构系统,并进行了相应的试验研究。

## 1 检测原理

线激光发生器用于向被测物体表面投射 1 束垂直的线状激光,它是将半导体激光器输出的点激光束经过圆柱透镜扩束来实现的。由于路面的高低起伏,激光线条发生变形,用面阵 CCD 相机捕获激光照射路面形成的光栅,形成数字图像,每采集 1 幅数字图像,就获得该亮线对应的路面表面轮廓线上的所有点的信息,对轮廓点信息进行分析计算得到这条亮线上的三维高度点云数据,相机采集整个待测区域的路面轮廓线,即得到整个区域的路面三维信息,最后根据三维点云数据实现路面表面形貌的三维重构。线结构光三维成像法如图 1 所示。图 1 中  $x$  为道路的横断面方向, $y$  为道路的纵断面方向(行车方向), $z$  为路面的标高<sup>[19]</sup>。

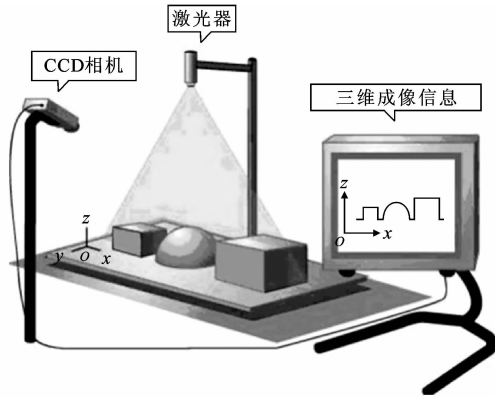


图 1 线结构光三维成像法

Fig. 1 3D imaging method of line-structure light

本系统研究对象为沥青路面,表面较粗糙,宜选用直射式激光三角法计算路面三维深度信息。直射式激光三角法原理如图 2 所示。

如图 2 中所示, $x$  为待测物离实物表面纹理实际变化距离; $x'$  为激光发射光源感光探测表面捕捉的像点位移; $a$  为系统距离常量,表示投射激光主光轴与系统数据接收透镜镜面  $C$  之间的固定位置关系; $b$  为系统距离常量,表示 CCD 相机成像表面与系统数据接收透镜镜面之间的固定位置关系; $\theta$  为系统角度常量,表示投射激光主光轴与数据接收透镜主光轴之间固定的角度关系; $d$  为系统距离常量,表示数据接收透镜中心点与投射激光主光轴时间的

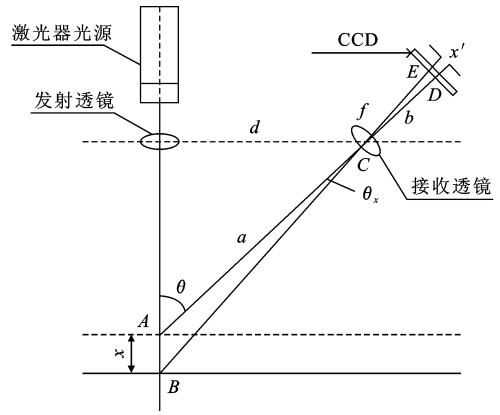


图 2 直射式激光三角法原理

Fig. 2 Principle of direct laser triangulation

固定位置关系; $f$  为系统固有常量,表示实现数据接收的透镜焦距大小; $\theta_x$  为路面深度凹凸点与接收透镜之间角度差。

在  $\triangle ABC$  中,由正弦定理得

$$\frac{a}{\sin(\theta - \theta_x)} = \frac{x}{\sin(\theta_x)} \Rightarrow x = \frac{a \sin(\theta_x)}{\sin(\theta - \theta_x)} \quad (1)$$

由式(1)可得

$$x = \frac{a}{\sin(\theta) \cot(\theta_x) - \cos(\theta)} \quad (2)$$

直角  $\triangle CDE$  中,  $\cot(\theta_x) = \frac{b}{x'}$ ,代入式(2)得

$$x = \frac{a}{\sin(\theta) b/x' - \cos(\theta)} \Rightarrow \frac{ax'}{b \sin(\theta) - x' \cos(\theta)} \quad (3)$$

将  $\sin(\theta) = \frac{d}{a}$ ,  $\cos(\theta) = \frac{\sqrt{a^2 - d^2}}{a}$ ,代入式(3)

可得

$$x = \frac{a^2 x'}{bd - x' \sqrt{a^2 - d^2}} \quad (4)$$

由于  $bd \gg x' \sqrt{a^2 - d^2}$ ,一般取  $b = f$ ,所以式(4)可简化为

$$x = \frac{a^2 x'}{fd} \quad (5)$$

式(5)即为求取路面深度实际位移变化公式,是系统捕获的相机成像表面像点位移到路面实际位移的转换方法。可见,当被测道路表面纹理有垂直方向上高低起伏的变化( $x$ )时,与其相对应的相机成像平面中像元的位移就会发生相应的变化( $x'$ )。由于在实际的数据采集系统中,系统固定的距离常数  $a$ 、 $d$ 、 $f$  以及固定角度常量  $\theta$  均为确定的已知量,于是就可以通过式(5)计算获得被测道路垂直方向上的实际凹凸起伏变化。

2 三维数据采集系统

2.1 系统总体布局及功能设计

本文设计实现的基于线结构光的沥青路面表面形貌数据采集系统是针对中国道路三维信息检测要求而研发设计的集光、电一体化和自动化的三维检测设备,可以完成对待测沥青路面表面形貌数据的采集、分析、处理、三维显示等功能的一体化实现。该部分内容主要进行系统硬件部分的设计与实现。

根据直射式激光三角法的基本原理,将激光器、图像接收装置 CCD 相机及被测量物体三点摆放成位置固定的三角关系,形成一个闭合的三角形光线环路。线结构光激光器的发射平面与 CCD 相机的接收透镜中心处于同一高度,距离地面高度为 40~50 cm,线结构光激光器垂直于地面放置,CCD 相机倾斜放置,激光器发射透镜和 CCD 相机接收透镜的法线夹角为 35°~50°,这样既可以保证相机的视场宽度,又可以达到测量精度的要求。系统总体布局如图 3 所示。

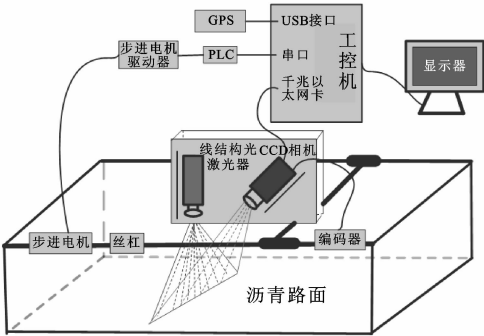


图 3 系统总体架构

Fig. 3 Overall layout of system

系统硬件平台主要完成路面表面三维形貌数据的采集功能,通过对整个系统各部分功能及技术指标的分析,将系统功能分解,采用模块化设计,提高了系统的抗干扰性,使系统结构简单清晰,免去了复杂的连线,便于调试、维修,缩短了开发周期,降低了开发、维护的成本。具体设计的模块包括电源模块、下位机控制模块、计数触发模块、激光三角检测模块、GPS 定位模块和数据处理模块。采集系统硬件功能模块如图 4 所示。

电源模块作为整个系统的供电部分,为整个系统提供稳定的电力支持。在对路面表面数据采集过程中,首先 GPS 定位模块通过 USB 接口向工控机提供车辆行驶的速度和位置信息,工控机由串口通过自由口协议向 PLC(可编程控制器)发送控制指

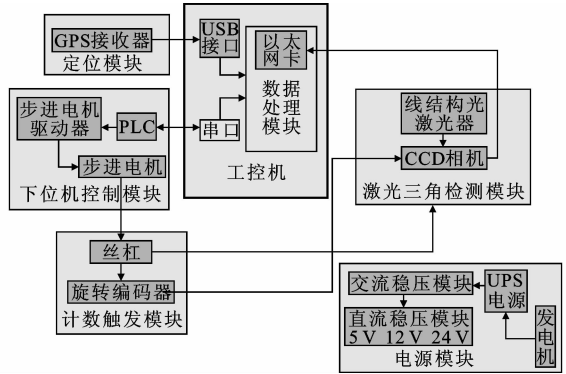


图 4 采集系统硬件功能模块

Fig. 4 Hardware function module of acquisition system

令,PLC 控制步进电机驱动器驱动步进电机转动,同时 PLC 实时地将位置信息反馈给工控机;步进电机通过丝杠(进给装置)带动面阵相机与线激光器共同运动,面阵相机根据旋转编码器输出的方波脉冲触发相机电子快门进行拍摄。面阵相机拍摄的是直射到采集区域形成的每一条路面剖面轮廓的激光线条,相机把采集到的图像信息遵照 TCP/IP 协议通过千兆以太网卡传送回工控机主机进行处理,然后根据激光三角法计算出路面的三维深度信息,并重构出采集区域的三维立体图。

2.2 硬件系统各模块功能设计

2.2.1 电源模块

电源是保证系统稳定工作的前提,电源的稳定性决定了系统的稳定性。系统电源模块由车载发电机、UPS(不间断电源)、蓄电池组和稳压块组成。由于本系统在室外工作,UPS 可提防瞬间掉电,在满足系统功率、电磁兼容性、空间和成本的要求下,具有过流限制、过热保护、短路保护及电池极性接反保护的特点,可为系统提供稳定、不间断的电力供应、便于车载小型化设计。电源模块如图 5 所示。

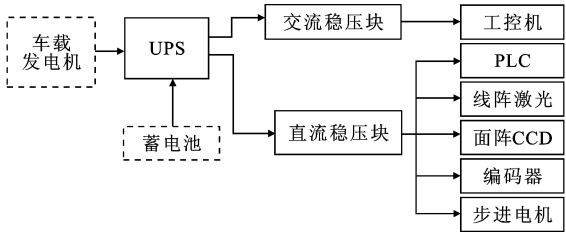


图 5 电源模块

Fig. 5 Power module

2.2.2 下位机控制模块

下位机控制模块主要用于控制丝杠及旋转编码器旋转,同时带动激光三角检测装置的移动。主要器件有西门子 S7-200 PLC、两相混合式步进电机驱动器、两相四线混合式步进电机、直流三线式 PNP

型接近开关。系统中 PLC 作为步进电机的控制器,为步进电机的正常运转提供脉冲信号;步进电机驱动器为步进电机的正常运转提供电力;接近开关作为位置开关,起限位作用,并且为上位机的自动控制提供电平触发信号。为了自动、准确地实现路面三维数据采集的控制过程,同时对于系统要求位置控制精度高的特点,电机的控制采用了闭环控制系统。电机位置调节控制框图如图 6 所示。PLC 是实现系统可靠运行的关键,其主要功能是存储控制程序,检测外设信号,向外部设备发送控制指令。PLC 与步进电机驱动器和步进电机接线如图 7 所示。

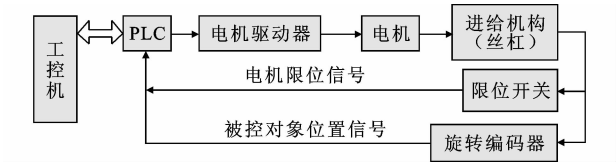


图 6 电机位置调节控制框图

Fig. 6 Block diagram of motor position control

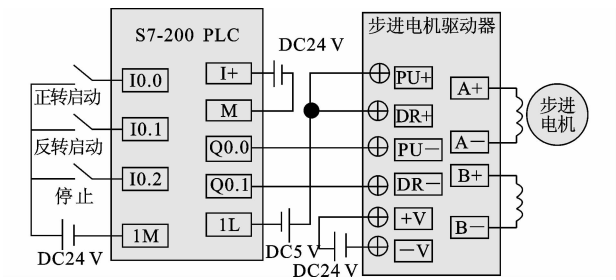


图 7 PLC 与步进电机驱动器和步进电机接线

Fig. 7 Wiring of PIC and stepper motor drive and stepper motor

### 2.2.3 计数触发模块

计数触发模块主要功能是通过旋转编码器测量步进电机的转动速度和角位移,以输出数字脉冲的方式控制 CCD 相机的外触发和拍摄频率。主要器件有丝杠和 DKS40 系列小巧型增量型编码器。为了保证步进电机控制的编码器和相机采集频率达到一致,系统中将步进电机通过丝杠与旋转编码器同轴安装,丝杠与编码器的安装如图 8 所示。

本编码器具有 IP64 的高外壳防护等级,电气接口类型选用 TTL/RS4226 通道中的长线差分驱动 A、B 相输出,其脉冲输出形式如图 9 所示。

面阵相机有 3 个接口,如图 10 所示。分别是以太网线接口,电源线接口和控制线接口,旋转编码器输出的数字脉冲通过控制线接口控制相机的外触发和拍摄频率。

该检测系统线激光器距离地面高度为 50 cm,激光光源宽度为 1 cm。经过测试标定,本检测系统

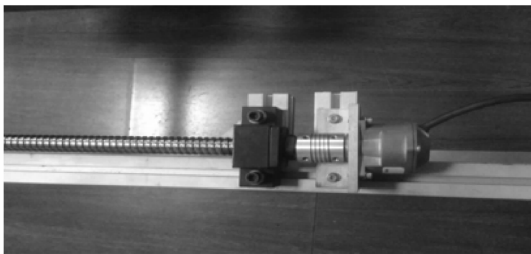
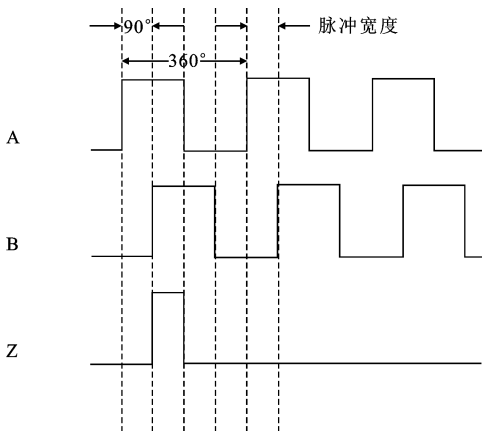


图 8 丝杠与编码器的安装

Fig. 8 Installation of screw and encoder



正对编码器轴顺时针方向旋转

图 9 编码器脉冲输出形式

Fig. 9 Output form of encoder pulse

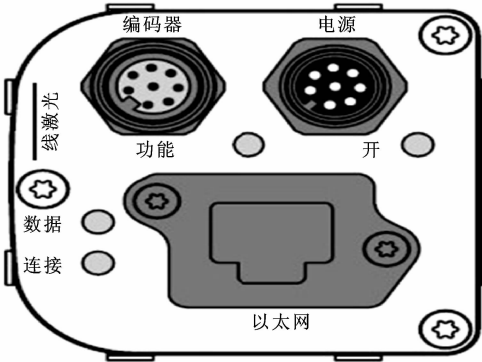


图 10 相机接口

Fig. 10 Camera interface

相机视场横向距离 556 mm。检测相机的分辨率为  $1\,536 \times 512$ , 因此相机在横向上 1 个像素代表的实际距离为  $556\text{ mm}/1\,536 \approx 0.362\text{ mm}$ 。为了使相机采集到的图像不失真,相机横向和纵向的分辨率必须一致,即纵向上 1 个像素也应该代表 0.362 mm。由于该检测系统中相机移动的距离为 500 mm,则相机被触发的次数为  $500/0.362 \approx 1\,381$  次。所以相机相邻 2 次触发中间隔的脉冲数为  $104 \times 1\,024/1\,381 \approx 77$ 。这样就保证了采集到数据的准确性。

本检测系统中使用 Ranger D50 相机,其外触发

模式主要通过和相机连接的编码器输出的脉冲控制相机的拍摄频率。由电机控制检测装置对路面进行扫描的过程中编码器旋转 104 圈,编码器每旋转 1 圈产生 1 024 个脉冲,整个检测过程中相机被触发 1 381 次,所以相机相邻 2 次触发中间隔的脉冲数为 77。

2.2.4 激光三角检测模块

激光三角检测模块主要完成 CCD 相机对路面三维原始图像数据的采集。激光光源提供照射路面的激光,使得路面的纹理信息能够进行光学体现,为了获得最佳的采集效果,CCD 相机添加带通滤光镜头,滤除该激光频段以外的其他杂散光的影响,实现全天候的采集。

系统将线阵激光器和 CCD 相机以及相应的电源和连接线都封装在一个密封效果较好的装置内部,前面板留有相机透视口(通过高透光率光学玻璃进行密封)、激光发射口、激光器远程控制线接口作为图像采集设备对外界的接口,每次安装时只需在室内标定好激光器的光带宽度和相机的视场宽度,然后直接将整个装置安装到承载车上即可。这样封装方便安装、标定、节省空间,且能防水、防尘、防震。激光三角检测模块的封装如图 11 所示,实物如图 12 所示。相机采用外触发方式,相机数据采集流程如图 13 所示。

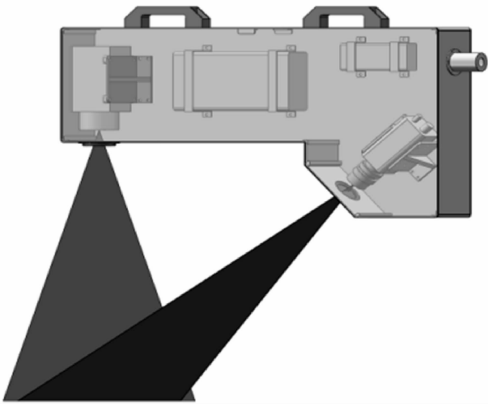


图 11 激光三角检测模块封装

Fig. 11 Encapsulation of laser triangulation detection module

2.2.5 GPS 定位模块

GPS(全球定位系统)定位模块在采集路面图像信息时,实时记录图像的位置,便于后面的图像处理。GPS 能实时提供高精度的三维位置和速度信息。系统中 GPS 接收器通过串行通信把 GPS 定位信息传递给工控机,工控机对 GPS 数据信息进行解析。解析 GPS 数据时,采用固定数据输出格式,即 \$GPGGA,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,M,<10>,M,<11>,<12>\*xx<CR><LF>。这帧 \$GPGGA 语句包括 17 个字段:语句标识头,世界时间,纬度,纬度半球,经度,经度半球,定位质量指示,使用卫星数量,水平精确度,海拔高度,高度单位,大地水准面高度,高度单位,差分 GPS 数据期限,差分参考基站标号,校验和结束标记(用回车符<CR>和换行符<LF>),分别用 14 个逗号进行分隔。当将本系统设计成车载检测系统时,对 GPS 数据进行解析、截取,获取车辆行驶的速度和位置信息,以此控制相机的采集频率。GPS 信号接收过程如下页图 14 所示。

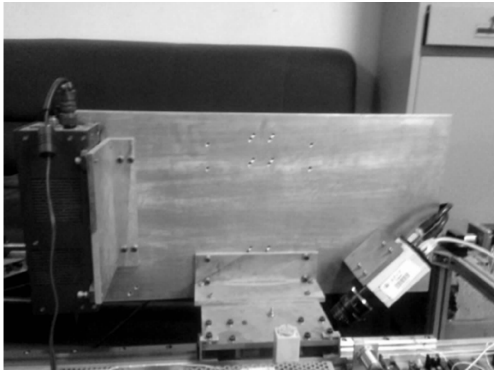


图 12 激光三角检测模块

Fig. 12 Laser triangulation detection module

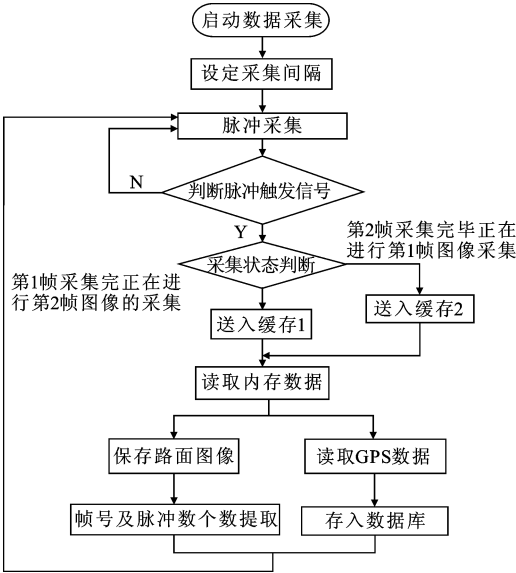


图 13 CCD 相机数据的具体采集流程

Fig. 13 Specific acquisition process of CCD camera data

<6>,<7>,<8>,<9>,M,<10>,M,<11>,<12>\*xx<CR><LF>。这帧 \$GPGGA 语句包括 17 个字段:语句标识头,世界时间,纬度,纬度半球,经度,经度半球,定位质量指示,使用卫星数量,水平精确度,海拔高度,高度单位,大地水准面高度,高度单位,差分 GPS 数据期限,差分参考基站标号,校验和结束标记(用回车符<CR>和换行符<LF>),分别用 14 个逗号进行分隔。当将本系统设计成车载检测系统时,对 GPS 数据进行解析、截取,获取车辆行驶的速度和位置信息,以此控制相机的采集频率。GPS 信号接收过程如下页图 14 所示。

2.2.6 数据处理模块

数据处理模块主要完成数据的传输、存储。相机采集图像数据后,面临的首要问题是如何将图像数据高速、实时地传输至工控机进行后续的相关图

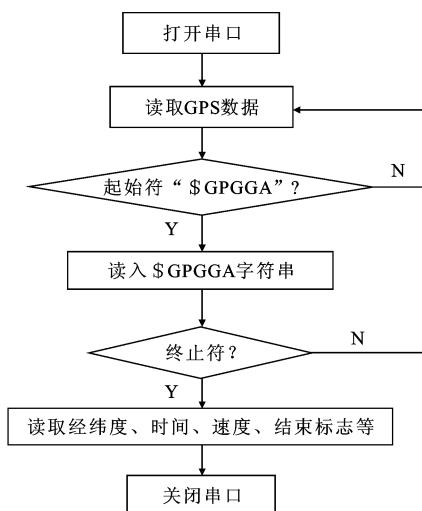


图14 GPS信号接收过程

Fig. 14 Receiving process of GPS signal

像处理及数据分析。千兆以太网具有传输带宽高,传输距离远和很高的性价比,系统采用千兆以太网作为相机端和工控机端传输总线接口,配合千兆以太网卡,采用RJ-45接口双绞线接入,使用TCP/IP协议,搭建相机高速实时传输平台,有效地解决了图像包含的数据量大,在短时间内传输多帧图像会出现网络堵塞,造成图像的丢失或错误等问题,且传输时不通过CPU,直接与内存进行数据交换,降低网络传输的负担,减轻主机负载,避免影响图像的质量,提高了系统的可靠性。

### 3 系统应用与检测结果分析

为了测试本系统的性能,本文使用沥青试件模拟了不同老化程度系统的三维重构效果<sup>[20]</sup>。系统实物设计如图15所示,激光扫描沥青试件如图16所示。下页图17为不同沥青试件使用本系统进行路面三维重构与原始试件的对比情况,从图中可以直观地看出本系统能获得良好的沥青路面三维重构效果。其中图17(a)、(b)、(c)分别为试验中采用烘箱加热法获得的老化程度不同的沥青试件,试件1、2、3的沥青试件老化程度依次由人眼视觉难以辨别的微小情况递增,这种变化在系统采集到的三维数据中表现很明显,从其各自相应的三维重构结果中可以看到;图17(d)、(e)、(f)所示的三维重构结果却有明显的差异,基于该重构结果可以进一步研究沥青路面的老化、疲劳寿命等重要特性。

为了进一步定量分析本系统的性能,本文采用式(6)求取沥青试件与三维重构后路面深度值的相关系数<sup>[21]</sup>,表示为

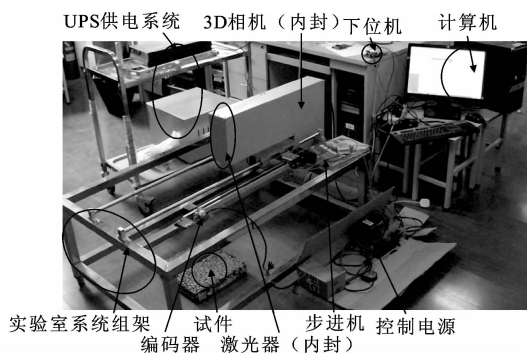


图15 系统实物设计

Fig. 15 Design of entity system

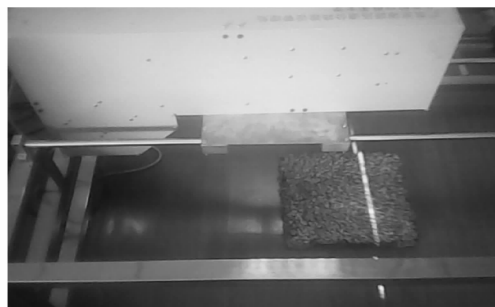


图16 激光扫描沥青试件

Fig. 16 Laser scanning asphalt specimen

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (6)$$

式中: $n$ 为数据点数,在本系统中为1536; $x$ 、 $y$ 分别为沥青试件和三维重构获得的路面深度值。

试件1、2、3求取的相关系数分别为0.956、0.972、0.963,进一步验证了本系统三维重构的精确性。

### 4 结 语

(1)由于沥青路面表面粗糙程度大,噪声复杂,因此,其三维数据采集系统从软硬件设计到算法设计各个方面对精度的要求都很高。采用红外线阵激光器搭配面阵CCD相机的沥青路面表面形貌三维数据采集技术可以在线实时准确地采集到沥青路面采集区域的高度信息,并且能直观地重构出检测区域表面的三维形貌。

(2)室内室外试验测试表明,系统性能稳定,满

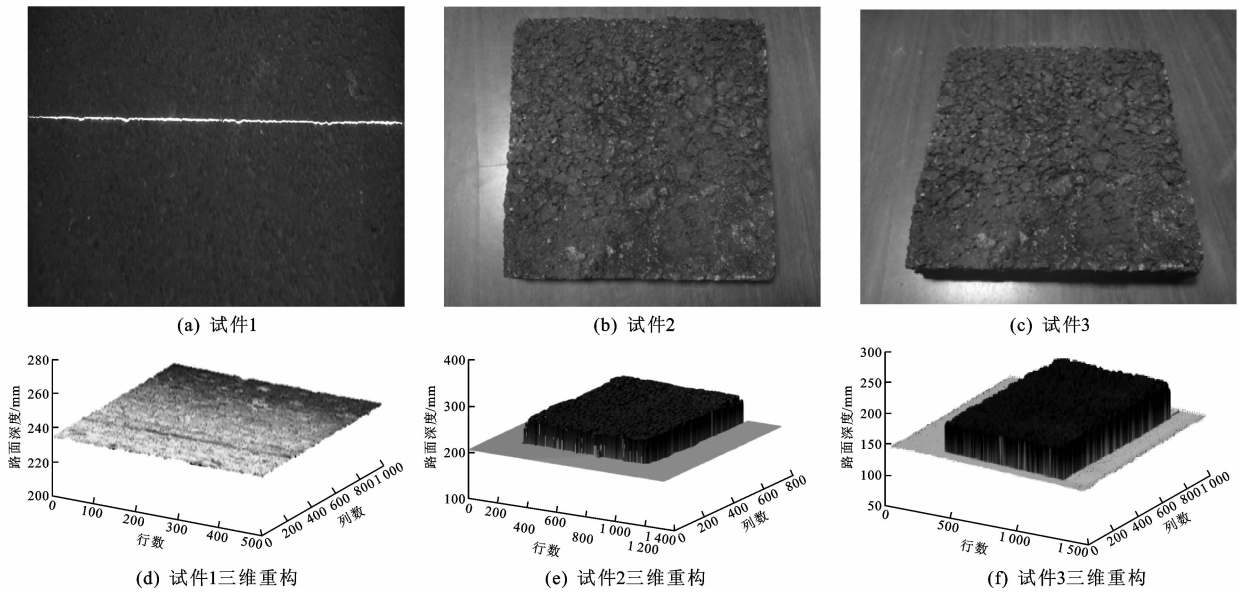


图 17 沥青试件及三维重构

Fig. 17 Asphalt specimens and their 3D reconstructions

足现场检测的要求。将整套检测设备安装在检测车上能运行稳定,提高了采集系统自动化、可视化、智能化水平,为沥青路面技术状况评定、养护提供了科学依据。

(3)本文主要研究了沥青路面三维数据的采集以及初步的路面形貌三维重构,对于获得 3D 数据后进一步的路面破损程度检测、纹理特性研究等将是下一步的研究内容。

参考文献:

References:

[1] 曹平,严新平,白秀琴,等. 沥青路面形貌检测方法的研究现状[J]. 中外公路,2008,28(2):21-24.  
CAO Ping, YAN Xin-ping, BAI Xiu-qin, et al. Research status of morphology detection method of asphalt pavement [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2008, 28(2): 21-24. (in Chinese)

[2] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
MA Rong-gui. Research on the principle and method of road three-dimension measurement system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)

[3] 孙朝云,邹鹏,李伟,等. 基于 OpenGL 路面裂缝三维重构技术研究[J]. 中外公路,2014,34(5):73-76.  
SUN Zhao-yun, ZOU Peng, LI Wei, et al. Study on three-dimensional road cracks reconstruction based on OpenGL[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014, 34(5): 73-76. (in Chinese)

[4] 郝雪丽,孙朝云,李伟,等. 基于结构光的路面三维重构技术研究[J]. 计算机工程与技术,2015,36(8):2303-2307.  
HAO Xue-li, SUN Zhao-yun, LI Wei, et al. 3D road reconstruction research based on structured light[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(8): 2303-2307. (in Chinese)

[5] 马荣贵,汪花梅. 基于 GPS 和车辙的三维路面重构[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(10):1517-1521.  
MA Rong-gui, WANG Hua-mei. Three-dimensional road reconstruction based on GPS and ruts[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(10): 1517-1521. (in Chinese)

[6] 邹丽琼,周兴林,胡怡玮. 基于显微视觉的沥青路面微观纹理三维重构[J]. 武汉科技大学学报,2015,38(4):297-301.  
ZOU Li-qiong, ZHOU Xing-lin, HU Yi-wei. Three-dimensional reconstruction of asphalt pavement micro-texture based on micro-vision[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 38(4): 297-301. (in Chinese)

[7] 鲁植雄,徐浩,刘奕贯,等. 基于分形插值的三维路面重构与分析[J]. 农业工程学报,2014,30(22):188-194.  
LU Zhi-xiong, XU Hao, LIU Yi-guan, et al. Reconstruction and analysis of 3D road based on 3D fractal interpolation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 188-194. (in Chinese)



- [8] 李鹏飞,冯国胜,邓晓龙,等. 三维虚拟路面的谐波重构[J]. 汽车工程师,2014(11):24-27.  
LI Peng-fei, FENG Guo-sheng, DENG Xiao-long, et al. Three-dimensional virtual road's harmonic reconstruction[J]. Auto Engineer, 2014(11):24-27. (in Chinese)
- [9] 张娟,沙爱民,高怀钢,等. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):18-22.  
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, et al. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(2):18-22. (in Chinese)
- [10] VILACA J L, FONSEAC J C, PINHO A M, et al. A new machine for acquire pavement texture [C]//IEEE. 7th International Conference on Computational Cybernetics, Palma:IEEE, 2009:26-29.
- [11] VILACA J L, FONSECA J C, PINHO A C M, et al. 3D surface profile equipment for the characterization of the pavement texture-Textscan[J]. Mechatronics, 2010,20(6):674-685.
- [12] LEI J Y, WANG E J, ZENG J, et al. Research of acquisition method for pavement surface texture based on photometric stereo techniques[C]//IEEE. 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems, New York:IEEE, 2014:1596-1601.
- [13] SLIMANE A B, KHOUDIR M, BROCHARD J, et al. Characterization of road microtexture by means of image analysis[J]. Wear, 2008,264(5/6):1-5.
- [14] KHOUDEIR M, BROCHARD J. Roughness characterization through 3D textured image analysis: contribution to the study of road wear level[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2004, 19(2):93-104.
- [15] 王端宜,李维杰,张肖宁. 用数字图像技术评价和测量沥青路面构造深度[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2004,32(2):42-45.  
WANG Duan-yi, LI Wei-jie, ZHANG Xiao-ning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2004,32(2):42-45. (in Chinese)
- [16] 王晓嘉,高隽,王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):601-604,608.  
WANG Xiao-jia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(4):601-604,608. (in Chinese)
- [17] 唐磊,赵春霞,王鸿南,等. 基于图像三维地形模型的路面裂缝自动检测[J]. 计算机工程,2008,34(5):20-21,38.  
TANG Lei, ZHAO Chun-xia, WANG Hong-nan, et al. Automated pavement crack detection based on image 3D terrain model[J]. Computer Engineering, 2008,34(5):20-21,38. (in Chinese)
- [18] 张肖宁,孙杨勇. 粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究[J]. 公路交通科技,2011,28(1):19-24.  
ZHANG Xiao-ning, SUN Yang-yong. Research on measurement of surface micro-texture of aggregate using laser and its fractal character [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011,28(1):19-24. (in Chinese)
- [19] 王建锋,马建,马荣贵,等. 路面三维检测技术研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(6):1202-1205.  
WANG Jian-feng, MA Jian, MA Rong-gui, et al. Road three-dimensional shape measurement method with multi-laser-sensors[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010,34(6):1202-1205. (in Chinese)
- [20] 马峰,傅珍,沙爱民. 基于热分析质谱联用技术的沥青老化机理研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2014,34(6):7-12.  
MA Feng, FU Zhen, SHA Ai-min. Aging mechanism of asphalt based on thermal property and mass spectrum analysis [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014,34(6):7-12. (in Chinese)
- [21] 张明卫,王波,张斌,等. 基于相关系数的加权朴素贝叶斯分类算法[J]. 东北大学学报:自然科学版,2008,29(7):952-955.  
ZHANG Ming-wei, WANG Bo, ZHANG Bin, et al. Weighted naive Bayes classification algorithm based on correlation coefficients[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2008,29(7):952-955. (in Chinese)