doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.045

松散地面上车辙表面的非接触式激光测量*

李建桥[1]　王　洋[1]　党兆龙[2]　黄　晗[1]　刘庆平[1]　张晓冬[1]
(1.吉林大学工程仿生教育部重点实验室,长春 130025; 2.中国空间技术研究院,北京 100094)

摘要:车辙表面原始形貌数据对深入研究车轮与松散地面相互作用机理具有重要意义。为了快速准确地获得土槽试验中松散地面上车辙表面原始数据,设计了带有二维移动框架的激光扫描仪,该装置的最大扫描面积是650 mm×400 mm,测距范围为 0.05~65 m,扫描分辨率为 0.1 mm。在此基础上设计出带有一维移动框架的激光扫描仪,以满足月球车内场试验中快速测量车辙表面形貌的要求。对土槽试验与月球车内场试验中的车辙表面进行测量,试验结果表明所设计的激光扫描仪能够使用非接触测量方法在不扰动车辙的条件下获得车辙表面形貌的纵向断面图和三维图形。

关键词:松散土壤　车辙　非接触测量　激光测距传感器
中图分类号:S237; TH761　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2013)07-0264-05

Non-contact Laser Measurement of Rutting Surface on Loose Ground

Li Jianqiao[1]　Wang Yang[1]　Dang Zhaolong[2]　Huang Han[1]　Liu Qingping[1]　Zhang Xiaodong[1]
(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
2. *China Academy of Space Technology*, *Beijing* 100094, *China*)

Abstract: The rut geometric analysis is necessary for studying the interaction between the driving wheel and the loose soil. A laser scanner that consisted of a laser sensor and a 2-D traversing frame was developed to measure the digit parameters of ruts in the soil bin which were produced by the rigid wheel on loose soil. The maximum scanning area was 650 mm×400 mm, measurement range was 0.05~65 m and scanning resolution was 0.1 mm. A laser scanner with 1-D traversing frame which might be more appropriate for the measurements of rut deformation in the infield of rover was also discussed. The experimental results showed that the scanners could obtain the sections and the 3-D graphics of the surface of ruts by using contactless measuring method without disturbing the ruts.

Key words: Loose soil　Rut　Non-contact measurement　Distance laser sensor

引言

车辆在松散地面上行驶时,会引起土壤扰动,尤其是较深的车辙会造成行驶阻力增大,使车辆难以或无法通过,车辆的通过性不仅取决于自身的动力性,更取决于车轮与土壤互相作用的力学特性,因此快速准确地获得车辙表面原始形貌数据对深入研究车轮与松散地面相互作用机理具有重要意义[1~2]。国内外学者对小范围内土壤表面粗糙度的测量展开了相关的研究,总结起来有两类测量方法:接触式和非接触式。在接触式测量方法中使用探针接触土壤表面,由于土壤是一种松散介质,容易受到扰动破坏,接触式测量方法势必会造成原始土壤表面轮廓的变形,且工作效率低;非接触式测量方法测量土壤表面形貌时能够避免与土壤的物理接触,且精度高,速度快[3~6]。文献[5]介绍了一种基于激光位移传感器的土壤表面粗糙度测量装置,虽然其测距分辨率高达 0.1 mm,但其测距范围仅为 240~440 mm,且装置较为复杂不便于携带。文献[6]提供了一种基于数字摄像法的地表粗糙度测量装置,虽然其测

收稿日期:2012-11-28　修回日期:2013-02-06
*国家自然科学基金资助项目(50875107)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA101401-3)
作者简介:李建桥,教授,博士生导师,主要从事车辆地面力学和模拟月壤研究,E-mail:jqli@jlu.edu.cn

量速度快，但需要依靠软件进行数据处理与图像调整，导致测量误差大，试验测量结果的平均相对误差最大值为 2.93%，最高测距分辨率为 0.78 mm。

土槽试验能够有效模拟实际条件下车轮与土壤的相互作用，但土槽设备只能测量车轮的沉陷，无法测量车辙的表面形貌[7~9]。目前，将激光测距技术应用于松散地面上车辙表面形貌的测量还未见报道，为此本文设计带有二维移动框架的激光扫描仪，使用非接触式测量方法测量土槽试验中车辙的表面形貌。针对二维移动框架质量大且结构复杂不便于携带，又研究出更适合在月球车内场快速扫描车辙表面关键部位的带有一维移动框架的激光扫描仪。

1　试验仪器和方法

1.1　激光扫描仪

设计的带有二维移动框架的激光扫描仪如图 1 所示。

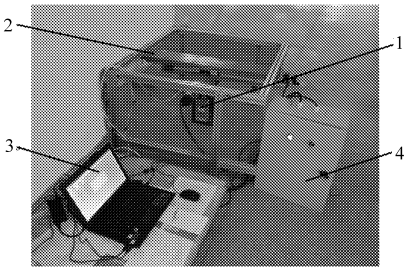


图 1　二维移动框架激光扫描仪

Fig. 1　Laser scanner with 2-D traversing frame

1. 激光测距传感器　2. 二维移动框架　3. 控制计算机　4. 控制箱

扫描仪所用的激光测距传感器型号为 DLS－C15，由瑞士 Dimetix 公司生产，是一种二级激光产品（功率小于 0.95 mW），测距范围为 0.05 ~ 65 m，测距分辨率达到 0.1 mm。二维移动框架由 2 个滚珠丝杠、4 个高精度轴承、2 个 57BYGH 型步进电动机及铝合金支架组成。二维移动框架激光扫描仪最大扫描面积为 650 mm × 400 mm，扫描速度为 1 mm/s，最小扫描步距为 0.025 mm，总质量为 104 kg，具有线扫描和面扫描两种扫描模式。在测量车辙前需要将激光扫描仪安装在土槽的顶部，土槽和激光扫描仪的总体结构布置如图 2 所示。

为了满足在月球车内场快速扫描车辙表面关键部位的需求，在二维移动框架激光扫描仪基础上又研究出一维移动框架激光扫描仪，如图 3 所示。一维移动框架由 1 个滚珠丝杠、2 个高精度轴承、1 个 57BYGH 型步进电动机及铝合金支架组成。一维移动框架激光扫描仪的扫描长度是 650 mm，最小扫描步距 0.025 mm，总质量 35 kg，具有快速扫描和慢速扫描两种扫描模式，扫描速度分别为 2.5、1 mm/s。

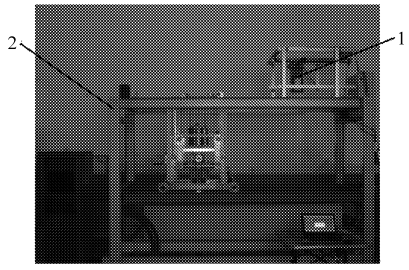


图 2　土槽和激光扫描仪的总体结构布置

Fig. 2　General structure design of soil bin and laser scanner

1. 激光扫描仪　2. 土槽装置

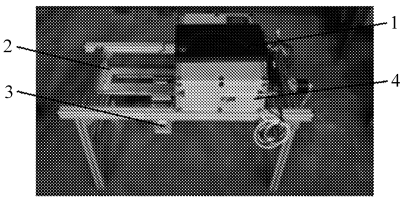


图 3　一维移动框架激光扫描仪

Fig. 3　Laser scanner with 1-D traversing frame

1. 控制计算机　2. 一维移动框架　3. 激光测距传感器　4. 控制箱

1.2　试验方法

1.2.1　土槽试验

试验在吉林大学土槽实验室中进行，所用车轮材料为铝合金，直径 250 mm，宽度 200 mm，轮刺高度 10 mm，轮刺数 18；所用土壤为课题组研制的 JLU－2 号模拟月壤。试验方法：首先进行整备，翻松土槽中的土壤，刮平；然后测量地面与激光测距仪的距离 H_1；开始土槽试验，车轮在土壤上压出车辙；最后测量车辙表面与激光测距仪的距离 H_2。H_2 与 H_1 的差值就是车辙表面的高度 H_3，位置关系如图 4 所示。在不同载荷（1 170、230、290、350 N）以及车轮转速（1、2、4 r/min）条件下进行线扫描试验，在不同的滑转率（0.09、0.31、0.43、0.86）条件下进行面扫描试验。

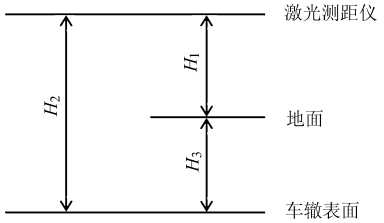


图 4　土槽扫描中位置关系示意图

Fig. 4　Position relation of scan in soil bin

1.2.2　月球车内场试验

试验在北京空间技术研究院月球车内场中进行，所铺土壤为 JLU－2 号模拟月壤，首先划出 3 个 1.5 m × 2 m 的区域进行整备，分别是不翻松（自然沉积状态）、翻松深度 15 cm、翻松深度 30 cm，然后刮平。月球车匀速直线行走，依次通过 3 个区域，车轮在松散的模拟月壤上压出车辙。试验方法如下：

先取一侧车轮压出的车辙进行扫描,在车辙左右两边铺好两块垫板,将扫描仪放在垫板上;沿着车辙横向放置一个基准板作为基准面,横向扫描 1 次,扫描长度要求大于基准板长度,可以算出基准板与地面的高度差值 H_4;调转扫描仪和垫板沿着纵向扫描车辙,可以算出基准板与车辙表面高度的差值 H_5,H_5减去 H_4 就是车辙表面高度 H_3,位置关系如图 5 所示。

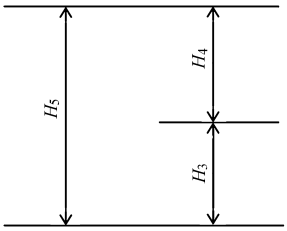


图 5 内场试验线扫描位置关系示意图

Fig. 5 Position relation of line scan in infield

2 结果与分析

2.1 激光测距传感器的标定

使用二级钢尺对激光测距传感器进行标定,二级钢尺的精确度是 ±(0.3 +0.2L)(mm),L 是测量距离,单位 m[10]。由于激光扫描仪在室内土槽和月球车内场的工作距离通常在 1 ~3 m 范围内,所以在激光测距传感器前 3 m 范围内每隔 0.5 m 选取一个测量点,每个测量点测量 10 次,选取平均值作为测量的最终结果。激光测距传感器的标定曲线如图 6 所示。

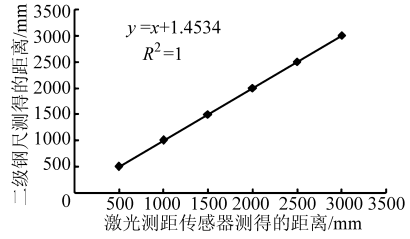


图 6 激光测距传感器的标定结果

Fig. 6 Result of calibration of distance laser sensor

2.2 土槽试验车辙线扫描

土槽试验中形成的车辙如图 7 所示。土槽试验中不同的载荷、车轮转速条件下车轮沉陷和车辙表面高度的测量结果如图 8、9 所示,其中车轮沉陷由土槽自带的 LEC150 型直线位移传感器测得,车辙表面高度由扫描仪测得。

从图 8 和图 9 中可以看出,车辙表面高度的绝对值要小于车轮沉陷的绝对值,这主要是由两个原因引起的:土壤是弹塑性材料,具有弹性和塑性特性,当车轮压过后土壤会发生塑性变形形成车辙并发生弹性恢复;车轮对土壤的剪切作用会产生“刨土”效果,向后挤压土壤。此外,车轮沉陷和车辙表

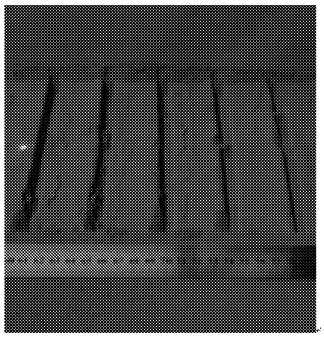


图 7 土槽中被测车辙

Fig. 7 Measured rut in soil bin

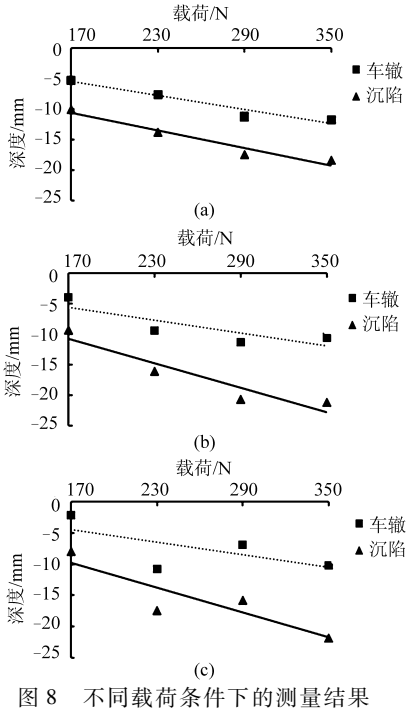


图 8 不同载荷条件下的测量结果

Fig. 8 Results of measurements under different load conditions

(a) 车轮转速 1 r/min

(b) 车轮转速 2 r/min

(c) 车轮转速 4 r/min

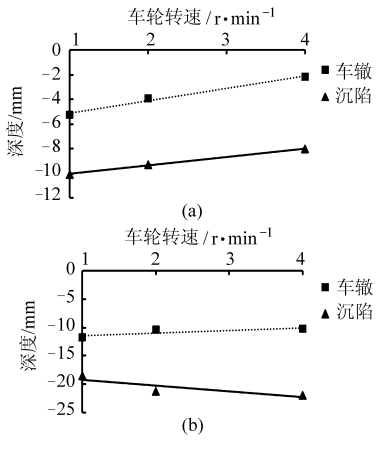


图 9 不同车轮转速条件下的测量结果

Fig. 9 Results of measurements under different wheel speed conditions

(a) 载荷 170 N (b) 载荷 350 N

面高度的绝对值都随着载荷的增加而增加。

2.3　土槽试验车辙面扫描

土槽试验条件：载荷 290 N，车轮转速 2 r/min，通过配置不同质量的砝码实现 4 种不同的滑转率 S；扫描试验条件为：扫描 204 mm × 252 mm，扫描步距 3 mm。不同滑转率 S 下车辙表面形貌面扫描结果如图 10 所示，可以清晰地看出随着滑转率的增大，车轮对土壤的剪切作用增强，车辙表面的完整性逐渐被破坏。面扫描方法可以获得车辙表面三维空间数字信息，为深入研究车轮与松散地面相互作用机理提供了基本测量条件。

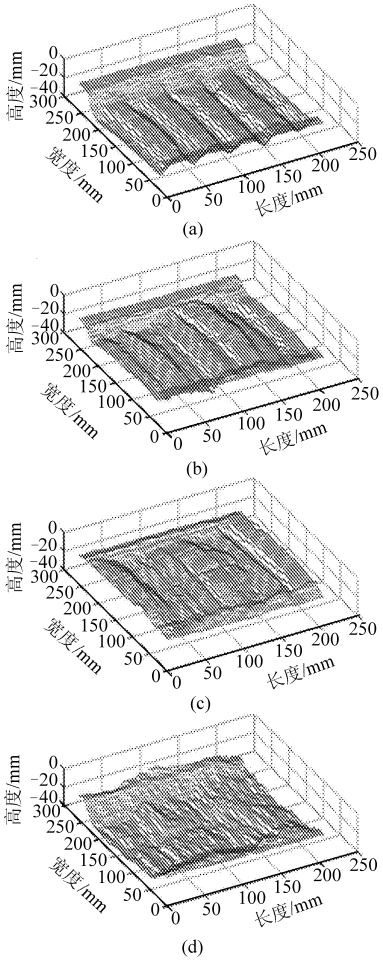


图 10　不同滑转率下面扫描结果

Fig. 10　Results of surface scan under different slip ratios

(a) $S=0.09$　(b) $S=0.31$　(c) $S=0.43$　(d) $S=0.86$

2.4　月球车内场试验车辙线扫描

内场试验形成的车辙及测量情况如图 11 所示。横向扫描基准板时，设定扫描长度 270 mm，扫描步距 5 mm，以提高扫描速度，节省时间；纵向扫描基准板时，设定扫描长度 400 mm，扫描步距 1 mm，以获得更多车辙表面的数据。处理横向扫描数据计算出基准面与地面的高度差 H_4，处理纵向扫描数据计算出基准面与车辙表面的高度差 H_5，从而求出车辙表面高度 H_3。

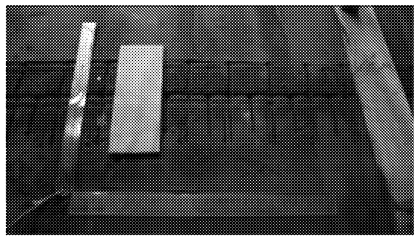


图 11　内场扫描车辙

Fig. 11　Rut scanning in infield

在纵向扫描数据基础上去除基准面的高度，再减去 H_4，便可得到车辙的纵向断面图；考虑到月球车行走一段距离后才进入稳态，只截取后面 250 mm 长度范围内的车辙表面数据；分别处理未翻松、翻松 15 cm、翻松 30 cm 区域车辙扫描数据，不同整备条件下车辙表面断面测量结果如图 12 所示。可以看出，未翻松时车辙深度约为 2 mm，翻松 15 cm 后车辙深度约为 4 mm，而翻松 30 cm 后车辙深度约为 8 mm，地形越松软车辙越深。车辙是周期性变化，凹陷是由轮刺在模拟月壤上压出，车辙表面高于地面的部分是由轮刺对模拟月壤的剪切作用引起的。

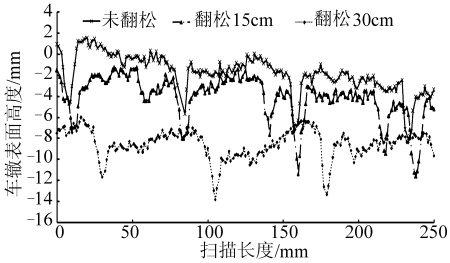


图 12　不同整备条件下车辙表面断面测量结果

Fig. 12　Results of sections measuring of rutting surface under different servicing conditions

3　结论

（1）研制出带有二维移动框架的激光扫描仪，测距范围 0.05 ~ 65 m，测距分辨率 0.1 mm，最大扫描面积 650 mm × 400 mm，最小扫描步距 0.025 mm，总质量 104 kg，具有线扫描和面扫描两种扫描模式，扫描速度 1 mm/s。

（2）研制出带有一维移动框架的激光扫描仪，测距范围 0.05 ~ 65 m，测距分辨率 0.1 mm，最大扫描长度 650 mm，最小扫描步距 0.025 mm，总质量35 kg，容易拆卸便于携带，具有快速扫描和慢速扫描两种扫描模式，扫描速度分别为 2.5 mm/s、1 mm/s，适合在月球车内场快速扫描车辙表面关键部位。

（3）试验结果表明，所研制的激光扫描仪通过线扫描方法可以测得车辙表面高度并可以生成车辙表面形貌纵向断面图，通过面扫描方法可以再现被测车辙表面形貌的三维图形。

参 考 文 献

1 Wong J Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering [M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2010.

2 Kun Liu, Paul Ayers, Heidi Howard, et al. Influence of soil and vehicle parameters on soil rut formation [J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(3):143 ~ 150.

3 Flanagan D C, Huang C, Norton L D. Laser scanner for erosion plot measurement[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(3): 703 ~ 710.

4 Johan Arvidsson, Elisabeth Bölenius. Effects of soil water content during primary tillage-laser measurements of soil surface changes [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1 ~ 2):222 ~ 229.

5 蔡祥,孙宇瑞,林剑辉, 等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(1):68 ~ 71,91.
Cai Xiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):68 ~ 71,91. (in Chinese)

6 李晓洁,赵凯,郑兴明. 基于激光三角法的地表粗糙度测试仪的研制[J]. 农业工程学报,2012,28(8):116 ~ 121.
Li Xiaojie, Zhao Kai, Zheng Xingming. Development of surface roughness tester based on laser triangulation method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 116 ~ 121. (in Chinese)

7 Kobayashi T, Fujiwara Y, Yamakawa J, et al. Mobility performance of a rigid wheel in low gravity environments[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(4):261 ~ 274.

8 陈斌. 履刺式刚性轮在沙土上的牵引特性研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
Chen Bin. Research on traction characteristics of the rigid wheel with grousers on sandy soil[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

9 全齐全. 月球车车轮与土壤作用的力学特性测试系统的研制与试验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
Quan Qiquan. Development and experiment of test-bed of wheel-soil interaction for lunar rover[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

10 JJG 4—1999 钢卷尺检定规程[S].