

张 伏,王 唯,张国英,等. 山羊坡地行走的步态分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(8):196-199.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.08.055

# 山羊坡地行走的步态分析

张 伏<sup>1</sup>,王 唯<sup>1</sup>,张国英<sup>2</sup>,王 俊<sup>1</sup>,邱兆美<sup>1</sup>,毛鹏军<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学农业装备工程学院,河南洛阳 471003;2. 洛阳拖拉机研究所有限公司,河南洛阳 471039)

**摘要:**为研究山羊坡地的行走状态和运动规律,以 36°坡地为例,采用高速摄像系统记录了山羊 36°坡地的上坡行走过程,并将运动序列存储至计算机中,利用 SigmaScan 软件和 Matlab 软件对存入计算机的试验影像结果进行处理分析,得出山羊 36°坡地上的运动步态特性参数和坡地运动过程中各腿腿部的角度变化曲线。结果表明,在 36°坡面的上坡过程中,山羊采用的步态为静步态和对角小跑步态;在上坡过程中,山羊各腿的负荷因数为  $0.645 \pm 0.205$ ,即腿处于支撑相的时间远大于处于移动相的时间,说明山羊各腿的支撑相大于移动相,这种特点可增加山羊运动的稳定性,为仿山羊农业机械坡地行走机构的设计提供基础试验数据,能够促进四足行走机构关键技术和应用领域的扩展。

**关键词:**农业工程;仿生;山羊;高速摄像;坡地;步态

**中图分类号:** S126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)08-0196-03

行走步态作为自然界动物最常使用的 1 种生物特征,是研究步行式行走机构的基础<sup>[1-3]</sup>。目前,随着行走机构研究的深入,单足、2 足、3 足、4 足、6 足、8 足甚至更多足数的步行式行走机构均已出现,其中以 4 足步行行走机构的研究最为广泛。近年来,研究地面各类 4 足行走动物的行走状态和运动规律有很多,但国内外对山羊这种 4 足哺乳动物的研究较少。山羊躯体较小,四肢骨骼坚实有力,它的支撑足离散地接触地面,可自主选择最佳落足点。其运动轨迹是一系列孤立的点,具有主动隔振能力,能以较高速度在凸凹不平 and 松软地面上运动,能耗较小,可远距离行走;其运动步态敏捷轻快,能在地面、坡地、陡壁和山区等凸凹不平的地表上自由灵活地进行跨越运动,受环境限制较小。山羊可作为行走机构研究的基础,为研究适应复杂环境的农业机械行走机构提供新思路<sup>[4-10]</sup>。本研究引入高速摄像技术对山羊 36°坡地运动状态进行了拍摄,并应用 SigmaScan 软件和 Matlab 软件对所拍摄图像进行了分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

本试验采用高速摄像仪(最高可达 10 000 帧/s)拍摄山羊在坡地的行走过程。试验过程中,由人牵引山羊,确保它在坡地上始终以直线状态行走,以减小拍摄误差,避免处理图像数据困难。固定摄像机于三脚架上,设置镜头于山羊前进运动的正侧面,并对摄像机的空间位置、取景范围、拍摄距离、光圈和焦距等硬件条件进行调整,保证镜头主光轴对准山羊运动范围的中心,尽可能地靠近山羊运动平面,使得山羊能够清晰成像。调整高速摄像仪,确保拍摄速度与不同坡地的山羊运动相适应,记录下山羊在 36°坡地的运动序列图像并储存至计算机中,然后利用 SigmaScan 图像软件采集分析山羊躯体关键点的数据,得出山羊在不同坡地运动中的对应系列特征参数及曲线。

### 1.2 试验对象

山羊属于偶蹄目,主要有头、颈、躯干和四肢组成。头部坚实,颈部与躯体、前肢良好结合,胸宽且深,肋骨张开,背腰宽厚平直,后躯宽长丰满,四肢强健,结构匀称,高度适中。试验对 1 头母山羊(1.5 年)进行了分析,其主要体态特征列见表 1。试验地点为河南省洛阳市郊区山坡,气温为 32~35℃。

表 1 山羊的体态特征

体长 (cm)	体高 (cm)	长高比	体质量 (kg)	前小腿长 (cm)	前大腿长 (cm)	后小腿长 (cm)	后大腿长 (cm)
138 0.5	90 0.5	1.53	42 0.5	16 0.5	30 0.5	23 0.5	23 0.5

### 1.3 试验设备

试验所用的仪器设备分为 3 类:第 1 类测试设备,包括高速摄像仪(FASTCAM-Super 10K,用于拍摄山羊运动过程)、倾角仪、机械磅秤(XSJ 2×1300W-20,用于山羊称质量)等;第 2 类照明设备,包括新闻灯(MODEL10000,用于摄像辅助光源);第 3 类数据处理设备,包括微型计算机、笔记本电脑和打印机等。

### 1.4 试验数据处理方法

从试验拍摄的图像中抽选出具有完整步态周期的序列图

收稿日期:2016-02-16

项目基金:河南省科技攻关项目(编号:152102210190);河南省产学研合作项目(编号:142107000055);河南省教育厅科学技术研究重点项目(编号:14B416004、14A416002、13A416264);河南科技大学自然科学领域创新能力培育基金(编号:2013ZCX002)。

作者简介:张 伏(1978—),男,河北邢台人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地面机械仿生技术和检测技术方面的研究工作。  
E-mail:zhangfu30@126.com。

像,利用 SigmaScan 图像软件处理图像数据<sup>[6-8]</sup>,并将测得的山羊四肢关键点的相对坐标值和对应关节处的角度值保存为 Excel 文件格式,然后将 Excel 数据导入 Matlab 软件对数据进行处理,最终得到山羊运动特征数据与曲线图<sup>[9-10]</sup>。

2 结果与分析

2.1 山羊步态周期分析

以每 2 幅图片之间的时间间隔 70 ms(即 8 帧)来选取 1 个完整的山羊步态周期图(图 1)。其中,山羊在此坡度上完成 1 个完整的步态周期需要花费 440 ms(共 44 帧)。试验中观察到的山羊的行走步态为静步态和对角小跑步态的交替运行。

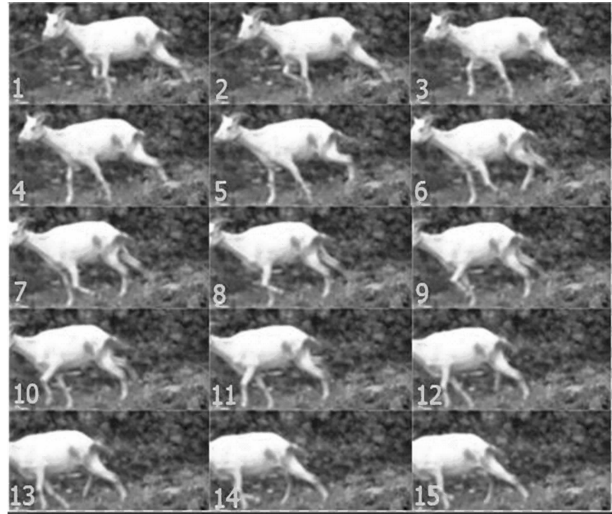


图1 36°坡度下的山羊上坡行走步态周期

1 个完整的步态周期内,山羊在 36°坡地上行走对应的行走速度为 71.1 cm/s,行走步距 127.5 cm。1 个完整的步态行走周期内,山羊在 36°坡地上行走所对应的单腿跨距、单腿步距、负荷因数见表 2。

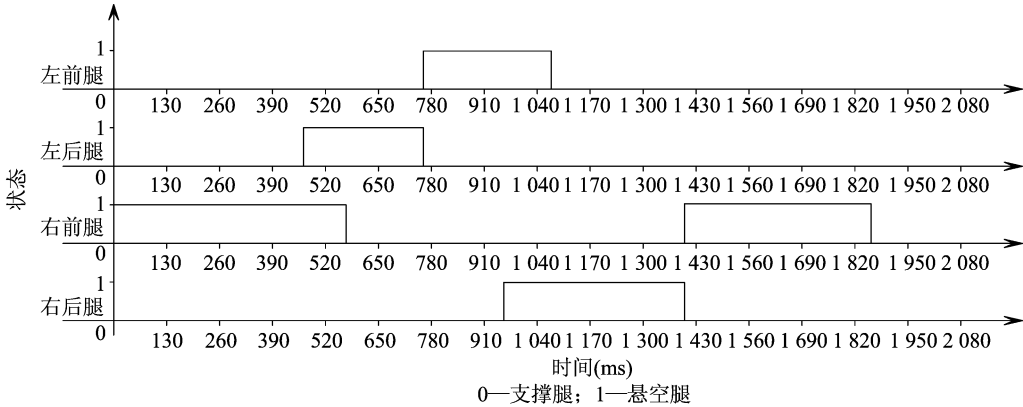


图2 36°坡地上的山羊上坡各腿的状态

1 个完整的步态周期内,山羊的各条腿支撑时期占整个步态运动周期的比例见表 3。

通过上述研究发现,山羊在 36°坡地上的上坡运动中总共经历 3 腿共同支撑时期 4 次;对角小跑步态 2 次;对角小跑所占用的悬空时间远小于 3 腿支撑所占用的悬空时间;随着山羊从坡底到坡顶过程中,对角小跑所占用的悬空时间越来

表 2 山羊坡地行走的单腿跨距

单腿	单腿跨距 (cm)	单腿步距 (cm)	负荷因数
左前腿	72.0	18.5	0.84
左后腿	73.5	31.0	0.85
右前腿	99.0	47.0	0.44
右后腿	73.5	36.0	0.76

由表 2 可知,在上坡过程中,山羊各腿的负荷因数为  $0.645 \pm 0.205$ ,即腿处于支撑相的时间远大于处于移动相的时间。说明总体上山羊各腿处于支撑相时需要较多的时间来稳定重心,当各腿处于移动相时,在空中处于摆动状态的各腿可产生惯性力矩,移动相时间较短可减少惯性力矩对身体的影响,加快与支撑相腿交换频率,从而增加身体的稳定性。

由图 2 可知,山羊在 36°坡地上向上行走过程中,走完 1 个步态变换周期共经历了 4 次 3 腿共同支撑时期。右前腿悬空时,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 480 ms;身体逐渐前移,右前腿迈步准备着地时,左后腿离地(即两腿处于短暂的悬空状态),左前腿与右后腿仍处于支撑状态时(对角小跑步态),此过程经历了 80 ms;随后左后腿悬空,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 200 ms;随之左前腿悬空,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 180 ms;身体逐渐前倾,重心前移,左前腿迈步准备着地时,右后腿离地(即两腿处于短暂的悬空状态),右前腿与左后腿仍处于支撑状态时(对角小跑步态),此过程经历了 120 ms;之后,右后腿悬空时,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 320 ms;接着右前腿悬空时,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 480 ms。至此山羊完成了 1 个完整的步态变换周期。随着 1 个步态周期的完成后,山羊的身体接着前移,右前腿迈步准备着地时,左后腿离地(即 2 条腿处于短暂的悬空状态),左前腿与右后腿仍处于支撑状态时(对角小跑步态),此过程经历了 60 ms;随后左后腿悬空,其他 3 条腿处于支撑状态,此过程经历了 280 ms。如此反复,形成了山羊的稳步行走<sup>[11-14]</sup>。

表 3 腿支撑时期占整个步态周期的比例

支撑类型	单周期出现次数
对角线两腿共同支撑	0.14
同侧两腿共同支撑	0.00
三腿共同支撑	0.86
四腿共同支撑	0.00

越小。本试验条件下可认为山羊在 36°坡地的上坡运动过程中主要为 3 腿共同支撑和对角小跑状态。

2.2 山羊腿部角度分析

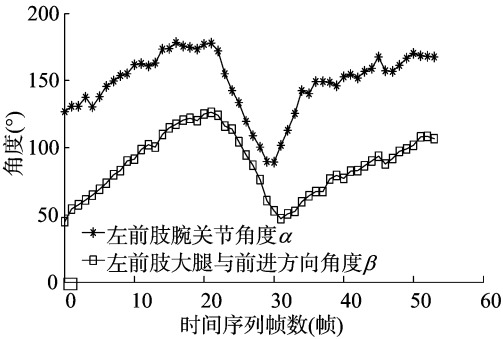
测得山羊 36°坡地上坡各腿的腿部角度变化范围值见表 4。

对山羊行走的 1 个步态周期的试验数据进行处理,得到山羊坡地行走时 4 条腿腿部角度变化曲线(图 3)。其中, $\alpha$ 角均表示为山羊在行走过程中大腿和小腿之间的夹角,即腕

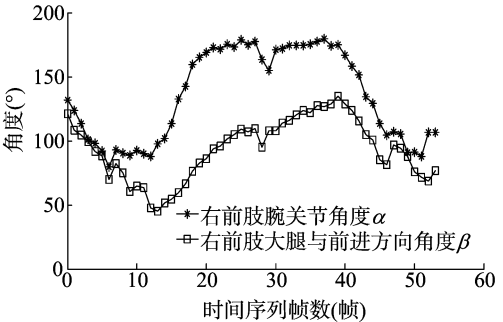
关节角度, $\beta$ 角均表示为山羊在行走过程中大腿与前进方向的夹角,即大腿与水平前进方向的夹角<sup>[11]</sup>。

表 4 山羊各腿的角度变化范围值

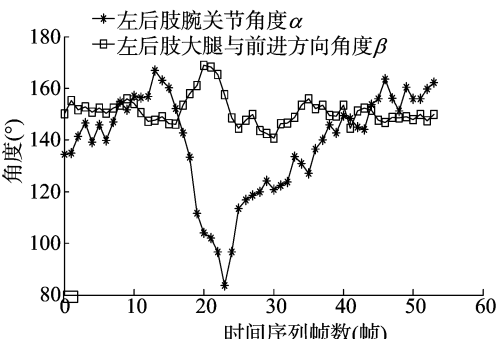
慢速坡地行走	角度范围
$\alpha$ 角(前腿)	80°~180°
$\beta$ 角(前腿)	45°~135°
$\alpha$ 角(后腿)	84°~167°
$\beta$ 角(后腿)	115°~172°



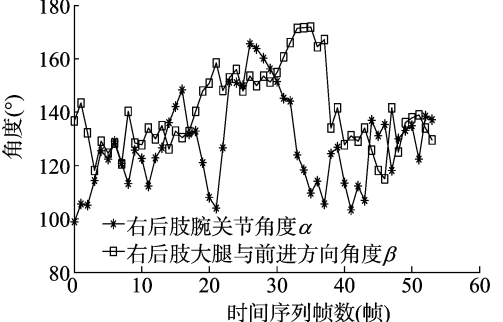
a.左前肢角度-序列帧数



c.右前肢角度-序列帧数



b.左后肢角度-序列帧数



d.右后肢角度-序列帧数

图3 坡地行走中四肢的角度-时间序列帧数曲线

山羊 36°坡地上坡行走过程中各腿的腿部角度变化结果如下。左前肢:左前肢在后屈离地抬起到前伸迈步着地的过程中, $\beta$ 角的曲线随着 $\alpha$ 角曲线的增大而增大、减小而减小;当 $\alpha$ 角处于峰值和低谷时, $\beta$ 角的值也处于对应的峰值和低谷处,说明在迈步运动过程中比较平稳。左后肢:左后肢在前屈离地抬起到前伸迈步着地的过程中,当 $\alpha$ 角处于最大值时, $\beta$ 角处于最小值;当 $\alpha$ 角第 1 次处于低谷时, $\beta$ 角为最大值。右前肢:右前肢在后屈离地抬起到前伸迈步着地的过程中, $\beta$ 角的曲线基本随着 $\alpha$ 角曲线的变化而变化,说明运动比较平稳。右后肢:右后肢在前屈离地抬起到前伸迈步着地的过程中, $\alpha$ 角较 $\beta$ 角变化平稳,当 $\alpha$ 角第 1 次出现峰值时, $\beta$ 角出现第 1 次的低谷现象;当 $\alpha$ 角第 3 次出现峰值时, $\beta$ 角出现再次的低谷现象; $\beta$ 角出现最大值时, $\alpha$ 角处于平缓状态;此后,当 $\alpha$ 角处于最大值时, $\beta$ 角处于低谷。

3 结论

对山羊坡地行走试验过程和试验方法进行了研究,重点分析了图像处理软件 SigmaScan 在高速摄像中的应用方法,并对山羊身上的关键点进行了运动学数据采集和归类,获得了较完整的运动学数据参数,为步态分析提供了研究基础。

利用 SigmaScan 软件处理分析了存入计算机的实验序列

图像,得出山羊 36°坡地上的运动步态特性参数和坡地运动过程中各腿腿部的角度变化曲线及规律性,为仿山羊坡地行走机构的设计提供了基础试验数据。

在本试验条件下可认为山羊在 36°坡地的上坡运动过程中主要为 3 腿共同支撑和对角小跑状态。

分析表明,山羊各腿的负荷因数为  $0.645 \pm 0.205$ ,即腿处于支撑相的时间远大于处于移动相的时间,说明山羊各腿的支撑相大于移动相,这种特点可增加山羊运动的稳定性。

参考文献:

[1] 张 伏,张国英,毛鹏军. 山羊躯体结构与影响步态运动因素的研究[J]. 农机化研究,2012,34(1):51-54.  
[2] 王建明,赵 彦,朱彦防,等. 基于 ADMAS 与 MATLAB 的四足机器人的 trot 步态联合仿真[J]. 机床与液压,2015(3):57-59.  
[3] Autumn K, Hsieh S, Dudek D, et al. Dynamics of geckos running vertically[J]. The Journal of Experimental Biology, 2006, 209 (Pt 2):260-272.  
[4] 孙祥一,胡 建,王鲲鹏,等. 高速摄像三维图像分析技术与应用[J]. 宇航计测技术,2010,30(6):30-34,44.  
[5] 李 杰. 大型六足仿生平台机器人机构设计及运动仿真[J]. 机械工程师,2014(10):178-180.  
[6] 贾蕴琪,曹致中,王赞文,等. 基于数字影像处理技术的结缕草秋

王芳,韩媛媛,魏星,等.河套蜜瓜跌落冲击特性[J].江苏农业科学,2017,45(8):199-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.08.056

# 河套蜜瓜跌落冲击特性

王芳<sup>1</sup>,韩媛媛<sup>1</sup>,魏星<sup>1</sup>,田海清<sup>1</sup>,张子义<sup>2</sup>

(1.内蒙古农业大学机电工程学院,内蒙古呼和浩特 010018; 2.内蒙古农业大学生命科学学院,内蒙古呼和浩特 010018)

**摘要:**为掌握蜜瓜的冲击特性,降低其在运输中受冲击作用的机械损伤,以河套蜜瓜为研究对象,采用正交试验和单因素试验,分别研究跌落高度、跌落角度、蜜瓜质量对冲击加速度的影响。结果表明:对冲击加速度的影响排序为跌落高度>跌落角度>蜜瓜质量,且蜜瓜质量对冲击加速度的影响显著;在质量、硬度相近的情况下,冲击加速度随着跌落高度的增加而增大,果梗垂直跌落时的冲击加速度比水平跌落的大,且冲击时间比水平跌落的长。试验结果对进一步研究蜜瓜的冲击力学特性、损伤机制有一定的借鉴意义。

**关键词:**河套蜜瓜;冲击;跌落;加速度

**中图分类号:** S121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)08-0199-03

蜜瓜是黏弹性体,且具有贮藏性差的特点,在运输过程中易受到冲击、振动、挤压等作用,造成损伤,从而影响其商品性和贮藏性<sup>[1]</sup>。研究蜜瓜冲击碰撞的力学行为,对于控制和预测跌落冲击损伤有理论意义。国内外一直以来都有相关学者在这一领域进行研究。Siyami 等对苹果做碰撞试验,通过多元线性回归方程建立苹果损伤直径预测模型<sup>[2]</sup>;Schoorl 等以苹果为研究对象提出著名的水果损伤能量原理<sup>[3]</sup>;Menesatti 等提出了下降损伤指数(DDI)的概念,并通过对 4 种果实(苹果、桃、梨、杏)的试验得出:DDI 可以用来测定果实冲击破坏的敏感度或抗力,还建立了桃的跌落冲击破坏预测统计模型<sup>[4]</sup>。Menesatti 等用线性模型和非线性模型分析了果实跌落损伤的破坏指标,经过比较分析,得出采用非线性模型来表示更加合适<sup>[5]</sup>;陈善锋研究了梨下落碰撞时不同因素的加速度特性<sup>[6]</sup>;卢立新进行了红富士苹果在不同高度下的跌落试验,根据结果进行模型参数的识别<sup>[7]</sup>;吴杰等采用感压胶片测量了香梨与 4 种材料碰撞时的接触应力,确定香梨果损伤与接触应力分布的关系<sup>[8]</sup>;孙慧杰等在吴杰等的研究<sup>[8]</sup>基础

上通过有限元模拟方法对香梨的损伤面积进行了预测分析<sup>[9]</sup>。

本试验以内蒙古当地的特产河套蜜瓜为研究对象进行跌落试验。测定蜜瓜的跌落损伤临界高度,分析跌落高度、跌落角度、蜜瓜质量对冲击特性的影响,以期预测蜜瓜损伤机制提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用河套蜜瓜作为试验材料,产地为内蒙古巴彦淖尔市。试验所选蜜瓜形状规则,硬度相近,表面无损伤,质量为 1.2~1.6 kg/个。

### 1.2 试验设备与方法

河套蜜瓜与刚性表面的跌落冲击试验系统如图 1 所示。加速度传感器为 BK 公司的 4500-B-001 系列。先将加速度传感器固定在蜜瓜表面,再将试样放置在冲击台托架上。在进行试验时,按动“升降”按钮自由选定试验所需高度,然后按动“准备”按钮,气缸活塞伸出,放置试样,再按动“跌落”按钮,使气缸活塞迅速缩进,试样作自由落体,并采用美国 Vision Research 公司的 Phantom Miro2 高速数字摄像机拍照,记录跌落全过程,用 BK 3050-B-060 型六通道 Pulse LAN-XI 数据采集卡进行数据采集和存储,然后用 TEMA 高速运动分析软件得到冲击跌落过程的时间-加速度曲线。

### 1.3 试验设计

按质量、硬度选取 3 组蜜瓜,每组蜜瓜质量差控制在 20 g

收稿日期:2016-05-10

基金项目:内蒙古自然科学基金(编号:2014MS0538);国家自然科学基金(编号:31160248)。

作者简介:王芳(1972—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,副教授,主要从事农牧业智能化研究。E-mail:nndwangfang@163.com。

通信作者:张子义,博士,副教授,从事农业与生物工程研究。E-mail:zybiology@126.com。

季枯黄动态分析研究[J].草业学报,2009,18(3):94-102.

[7]王立东,王良意,杨海涛,等. SigmaScan Pro 5 软件在脊柱影像测量分析中的应用[J].中国医师进修杂志,2007,30(增刊1):90-91.

[8]刘冠初,熊静琪,乔林,等.四足机器人自由步态规划建模与算法实现[J].西安交通大学学报,2015,49(6):84-89,144.

[9]Pa P S. Design of a modular assembly of four-footed robots with multiple functions[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2009,25(4/5):804-809.

[10]江励,管贻生,蔡传武,等.仿生攀爬机器人的步态分析[J].

机械工程学报,2010,46(15):17-22.

[11]肖世旭.大壁虎的三维步态实验及分析[D].南京:南京航空航天大学,2006.

[12]王洪波,徐桂玲,胡星,等.四足并联腿步行机器人动力学[J].机械工程学报,2012,48(23):76-82.

[13]谭小群,李军,赵国斌,等.一种重心调整装置在四足机器人步行中的应用[J].中国制造业信息化,2008,37(23):25-28.

[14]谢惠祥,罗自荣,尚建忠.四足机器人对角小跑动态控制[J].国防科技大学学报,2014(4):146-151.