

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.068

中华绒螯蟹平面运动三维观测和步态分析*

李建桥 张晓冬 邹猛 李豪 王洋 石睿杨

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

【摘要】 为了研究中华绒螯蟹在平面行走的步态,使用高速摄像机和三维运动分析软件建立了运动图像采集和分析系统。结果表明:中华绒螯蟹在行走时采用交替四角步态;相邻的两腿之间异步,相隔和对角线两条腿之间同步;各腿的负荷因数为 $(55.60 \pm 7.53)\%$,说明中华绒螯蟹通过增加支撑相使其身体在行走时更加稳定。

关键词: 生物力学 中华绒螯蟹 运动分析 步态

中图分类号: Q811 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0335-04

3-D Surveying and Gaits Analysis of Chinese Mitten Crab in Smooth Road

Li Jianqiao Zhang Xiaodong Zou Meng Li Hao Wang Yang Shi Ruiyang

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

In order to investigate the gait of Chinese mitten crab, a motion images recorded and analyzed systems was established with high speed camera and 3-D motion analysis software. The results showed that Chinese mitten crab performed alternating tetrapod gait when walking on smooth road. Adjacent ipsilateral and segmental pairs of legs alternated with each other; Subadjacent ipsilateral legs and diagonal pairs of legs moved together. Duty factor of each leg was $(55.60 \pm 7.53)\%$, which indicated that Chinese mitten crab made its body more stable during walking through increasing support phase.

Key words Biomechanics, Chinese mitten crab, Motion analysis, Gait

引言

动物经过亿万年的进化,产生了形式多样的运动器官和运动形式,以适应复杂的生存环境^[1]。螃蟹作为典型的多足节肢动物成为研究人员开发仿生机器人和仿生步行机构时理想的参考对象^[2-4]。目前,实验室研究主要使用高速摄像机捕捉小型动物的运动图像,并且使用跑步机、轨道等约束了小型动物的运动速度或运动方向^[5-6],但对动物在真实环境下运动和按照一定规律同其周围环境相互作用的研究也是理解其运动特征的关键^[7]。

本文使用高速摄像机组成三维运动图像采集系统采集中华绒螯蟹在平面上的自由行走图像;使用三维运动分析软件分析螃蟹采用的步法;统计螃蟹各腿的负荷因数,为仿生机器人或仿生步行机构的

研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验样品

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis milne-edwards*)属节肢动物门(*Athropoda*),甲壳纲(*Crustacea*),十足目(*Decapoda*),方蟹科(*Grapsidae*),绒螯蟹属(*Eriocheir*),善于掘穴而居,或隐藏在石砾、水草中。试验所用样本来自江苏省巢湖地区,雄性,质量35.31 g,甲壳长度43.28 mm,甲壳宽度38.38 mm。螃蟹养殖于装有清水的鱼缸中,每天更换清水并使用两栖动物专用饲料喂养。试验时的环境温度为18.3℃,湿度为39%。

1.2 试验仪器

使用2台CASIO EX-FH25型(日本,卡西欧计

收稿日期:2012-06-30 修回日期:2012-07-30

* 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,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail:jqli@jlu.edu.cn

计算机有限公司)高速摄像机采集中华绒螯蟹的三维运动图像,拍摄时使用的帧速率为 120 f/s,图像分辨率为 640 像素 × 512 像素;使用碘钨灯对试验现场进行照明;使用闪光灯(闪光持续时间 1/3 000 s)标记 2 台摄像机的起始拍摄时刻,作为后期图像处理的起始位置^[8]。在对中华绒螯蟹运动图像进行采集前,需要对三维运动分析系统进行标定,确定系统坐标系,标定所使用的仪器为 16 点三维标定框架(北京司钦森贸易有限公司),标定的测量空间为 0.6 m × 0.4 m × 0.2 m。三维运动图像分析使用 SIMI Motion 3D 运动分析系统。

1.3 试验与图像采集方法

用悬挂法确定中华绒螯蟹的质心在甲壳上的位置^[9](图 1a),使用 502 强力胶(主要成分:α-氰基丙烯酸乙酯)将白色标记点粘在该位置处(图 1b)。

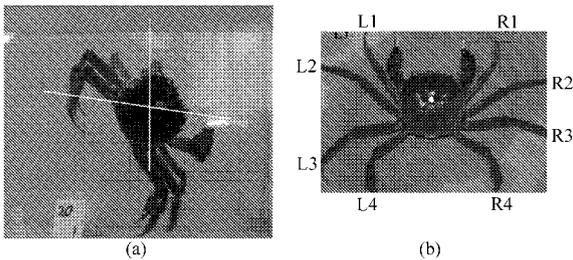


图 1 悬挂法确定质心位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of suspension method for defining position of mass centre

试验现场如图 2 所示。中华绒螯蟹运动观测试验前,将标定架摆放在平面上,对 2 台高速摄像机进行调整,使每台摄像机拍摄到至少 11 个标定点。在对摄像机进行调整的过程中,将两只螃蟹干燥标本放在观测范围内对高速摄像机的焦距进行调整,目的是试验时获得清晰的螃蟹运动图像。对标定框架进行拍摄后将标定框架移开,打开新闻灯,准备试验。

试验时,首先将 2 台高速摄像机的快门按下,摄像机开始记录运动图像,将螃蟹放置在拍摄范围之外,用玻璃棒对螃蟹进行刺激,使螃蟹运动到高速摄像机所能够拍摄到的有效范围内。当螃蟹进入图像拍摄范围内后不再对其进行刺激,使其能够在观测范围内自由运动。当螃蟹的步态趋于稳定时触发闪光灯,2 台摄像机记录下该闪光点,作为对图像分析处理的起始点。当螃蟹运动到图像拍摄范围以外时,高速摄像机停止记录,所拍摄的图像信息保存在摄像机的内存卡中,将摄像机中的图像信息拷贝到计算机中并详细命名。当螃蟹受到刺激时表现出攻击姿态,说明螃蟹处于疲劳状态,此时应停止试验,将螃蟹移回鱼缸内休息 24 h 后再进行试验。

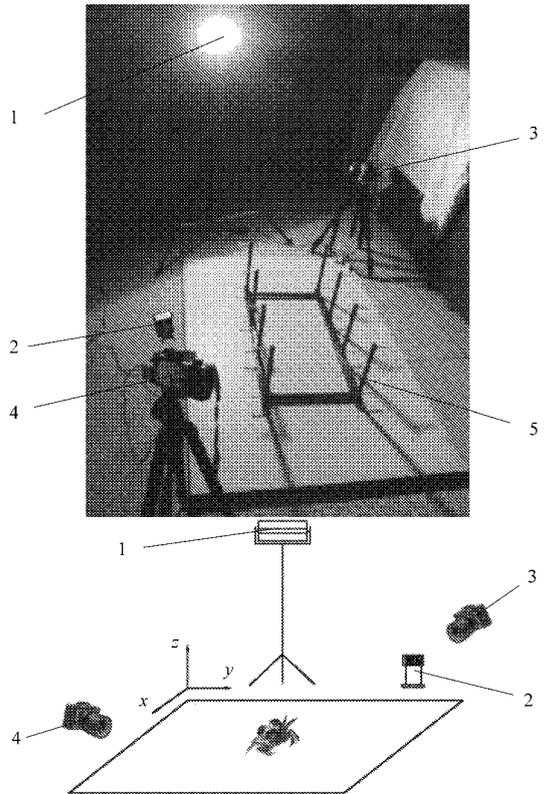


图 2 试验现场实景图 and 现场示意图

Fig.2 Schematic diagram of testing field and field
1. 碘钨灯 2. 闪光灯 3,4. 高速摄像机 5. 标定框架

中华绒螯蟹的运动图像使用 SIMI Motion 3D 运动分析系统进行分析(图 3)。

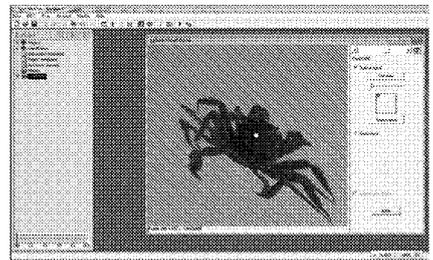


图 3 SIMI Motion 3D 运动分析系统

Fig.3 SIMI Motion 3D motion analysis system

2 试验结果和分析

2.1 算法

SIMI Motion 3D 运动分析系统可直接得出的质心运动学参数为: x 轴瞬时速率 v_x , y 轴瞬时速率 v_y , x 轴位移 s_x , y 轴位移 s_y 。

中华绒螯蟹的质心水平平均速率 \bar{v}_H (以下简称平均速率)的计算公式为

$$\bar{v}_H = \frac{s_H}{T} \quad (1)$$

其中

$$s_H = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (2)$$

式中 T ——中华绒螯蟹运动持续时间

s_H ——质心水平位移

负荷因数 β_i 是腿 i 在支撑相时间内所包含的周期时间^[10]

$$\beta_i = \frac{T_{si}}{T_{gi}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 T_{si} ——腿 i 的支撑相时间

T_{gi} ——腿 i 的周期时间

2.2 平均速率

根据式(1)和(2),在 Microsoft Excel 2007(美国 Microsoft 公司)软件中计算中华绒螯蟹的平均速率,得 $\bar{v}_H = 0.19 \text{ m/s}$ 。Full R J 和 Weinstein R B 对幽灵蟹(*Ocypode quadrata*)运动状态变化与新陈代谢和步频关系进行了研究,总结了幽灵蟹行走、慢跑和快跑所对应的速度,规定螃蟹在行走时的速度 $v \leq 0.4 \text{ m/s}$ ^[11]。根据中华绒螯蟹平均速率的计算结果,认为中华绒螯蟹在平面上运动时为行走状态。

2.3 步态

在 SIMI Motion 3D 运动分析系统中,对每一帧图像进行统计,分析中华绒螯蟹各个腿的支撑相和移动相^[10]。这里规定,支撑相为中华绒螯蟹爪指与平面接触的时间,在图 4 中使用黑色浮动棒表示;移动相为中华绒螯蟹爪指没有与平面接触的时间,在图 4 中用白色浮动棒表示;中华绒螯蟹一个完整的步态周期为螃蟹的一个爪指从接触平面开始到下一次接触开始^[12],螃蟹各腿的编号及步态如图 4 所示。

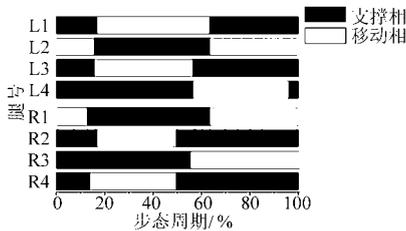


图 4 步态

Fig. 4 Step pattern

从图 4 中可以看出,中华绒螯蟹同侧的相邻两腿异步(如 L1 和 L2, L3 和 L4),同侧的相隔两腿之间同步(如 L1 和 L3, L2 和 L4);两侧相邻两腿异步(如 L1 和 R1, L2 和 R2),对角线两腿之间同步(如 L1 和 R2, L2 和 R1)。Barnes W J P 将这种步态称为交替四角步态^[13],其同步对角对如图 5 所示,图中的实心圆圈表示支撑相,空心圆圈表示移动相。

由图 5 可以看出,中华绒螯蟹在行走时始终有 4 条腿处于支撑相,即有 4 条腿始终与平面接触,将 4 条腿的爪指的支撑点使用直线依次连接起来得到一个四边形,螃蟹的质心在平面上的投影始终落在

四边形内,说明螃蟹在平面行走时具有良好的稳定性,这也是多足动物所具有的优点,所以中华绒螯蟹的步态特点是制定仿生机器人步法的理想参考对象。

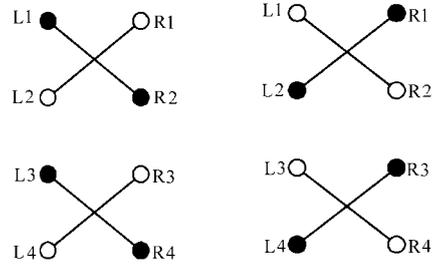


图 5 中华绒螯蟹交替四角步态同步对角对

Fig. 5 Synchronous diagonal leg pairs of alternating tetrapod gait for Chinese mitten crab

2.4 负荷因数

中华绒螯蟹各腿的负荷因数如表 1 所示。

表 1 各腿的负荷因数

Tab. 1 Duty factor of each leg

腿号	负荷因数/%	腿号	负荷因数/%
L1	46.69	R1	50.58
L2	47.67	R2	67.12
L3	59.34	R3	55.45
L4	53.50	R4	64.42

对表 1 各腿的负荷因数进行统计,统计结果以各腿负荷因数平均值和负荷因数标准差(平均值 \pm 标准差)表示。

经统计中华绒螯蟹的负荷因数为 $(55.60 \pm 7.53)\%$,即支撑相略大于移动相,说明螃蟹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,防止身体失稳。

3 结束语

使用高速摄像机和三维运动分析系统对中华绒螯蟹平面自由行走图像采集和分析表明:中华绒螯蟹在平面行走时采用交替四角步态,相邻的两腿之间交替着地;相隔和对角线两腿之间同步着地,因此螃蟹在平面上行走时始终有 4 条腿同时着地;螃蟹的负荷因数为 $(55.60 \pm 7.53)\%$,总体上支撑相大于移动相,这种特点可增加螃蟹运动的稳定性。

参 考 文 献

- 1 张秀丽,郑浩峻,陈恳,等. 机器人仿生学研究综述[J]. 机器人,2002,24(2):188~192.
Zhang Xiuli, Zheng Haojun, Chen Ken, et al. Research on robotic bionics[J]. Robot, 2002, 24(2):188~192. (in Chinese)
- 2 王立权,孙磊,陈东良,等. 仿生机器蟹样机研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2005,2(5):191~195.
Wang Liquan, Sun Lei, Chen Dongliang, et al. A bionic crab like robot prototype[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 2(5):191~195. (in Chinese)
- 3 袁鹏. 仿生机械蟹步行机理分析及控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
Yuan Peng. Research on walking mechanism analysis and control system of a crab-like biologically inspired robot[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2003. (in Chinese)
- 4 Perry M J, Tait J, Hu J, et al. Skeletal muscle types in the ghost crab, *Ocypode quadrata*: implications for running performance[J]. The Journal of Experimental Biology,2009,212(5):673~683.
- 5 Zhang Yan, Yu Minsu, Liang Yang. Experimentation of fish swimming based on tracking locomotion locus[J]. Journal of Bionic Engineering,2008,5(3):258~263.
- 6 Zhang Y, Huang H, Liu X Y, et al. Inematics of terrestrial locomotion in mole cricket *Gryllotalpa orientalis*[J]. Journal of Bionic Engineering,2011,8(2):151~157.
- 7 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: an integrative view[J]. Science,2000, 288(5463):100~106.
- 8 Weinstein R B. Locomotor behavior of nocturnal ghost crabs on the beach: focal animal sampling and instantaneous velocity from three-dimensional motion analysis[J]. The Journal of Experimental Biology,1995,198(4):989~999.
- 9 Full R J, Jindrich D L. Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion[J]. The Journal of Experimental Biology,2002, 205(18):2 803~2 823.
- 10 陈秉聪. 步行车辆理论及脚踝设计[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- 11 Full R J, Weinstein R B. Integrating the physiology, mechanics and behavior of rapid running ghost crabs: slow and steady doesn't always win the race[J]. AMER Zool,1992,32:382~395.
- 12 Blickhan R, Full R J. Locomotion energetic of the ghost crab II. Mechanics of the centre of mass during walking and running[J]. The Journal of Experimental Biology,1987,130(1):155~174.
- 13 Barnes W J P. Leg co-ordination during walking in the crab, *Uca pugnax*[J]. Journal of Comparative Physiology A,1975, 96(3):237~256.

(上接第 313 页)

参 考 文 献

- 1 Raper R L. Agricultural traffic impacts on soil[J]. Journal of Terra Mechanics, 2005, 42(3~4): 259~280.
- 2 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报,2005,36(10):161~164.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):161~164. (in Chinese)
- 3 孙忠英,李宝筏. 农业机器行走装置对土壤压实[J]. 农业机械学报,1998,29(3):172~174.
- 4 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社,1995.
- 5 张兴义,隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展[J]. 农业机械学报,2005,36(6):122~125.
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 122~125. (in Chinese)
- 6 Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 82(2):121~145.
- 7 Boivin P, Schaffer B, Temgoua E, et al. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modeling: experimental data and perspectives [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 88(1~2): 65~79.
- 8 Emmanuel C C, Vilas M S. Modeling compaction in agricultural soils [J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(2): 71~84.
- 9 Aragon A, Garcia M G, Filgueira R R, et al. Maximum compatibility of Argentine soils from the proctor test [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(3~4): 197~204.
- 10 Alexandr G. Tire load rating to reduce soil compaction [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40(2): 97~115.
- 11 Botta G F, Becerrac A T, Tourn F B. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(2): 381~386.