

文章编号: 1002-0446(2008)04-0333-07

两栖多足机器人水下步态分析

王立权, 刘德峰, 陈东良, 邓辉峰, 季宝锋, 王刚

(哈尔滨工程大学水下作业技术与装备实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 通过对两栖动物运动机理的研究, 针对两栖多足机器人水下行走的特点, 采用减轻重力、附加流体力的方法, 提出了静水环境下的动力学模型, 并基于对模型的分析提出了适用于两栖多足机器人水下运动的“蹬踏—漂浮”步态. 该步态不但解决了两栖多足机器人以陆地行走步态在水下行走时出现的抓地不牢及稳定性不够的问题, 而且提高了水下步行速度. 通过分析两栖多足机器人的水下实验结果, 验证了步态的可行性.

关键词: 多足机器人; 步态; 水下行走; 静水环境
中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Analysis on Underwater Gait of Amphibious Multi-legged Robot

WANG Li-quan, LIU De-feng, CHEN Dong-liang, DENG Hui-feng, JI Bao-feng, WANG Gang
(Underwater Operation Technology and Equipment Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the movement mechanism of amphibians and the characteristics of underwater walking of the amphibious multi-legged robot, a dynamic model in lenitic water is produced by reducing the weight and adding liquid forces, and through the analysis of the model, the “hoof-floating” gait is proposed for underwater walking of the amphibious multi-legged robot. The gait not only resolves the problems of slippage and instability which arise when the amphibious multi-legged robot walks in underwater conditions with the land gait, but also raises the walking speed. The underwater walking experiment results of the amphibious multi-legged robot verify the feasibility of the proposed gait.

Keywords: hand-eye vision system; self-calibration; disparity; depth value

1 引言 (Introduction)

长期生活在浅海水域以及沙滩、海浪环境使蟹具备了一些独特的运动技能. 借鉴蟹类的行为方式, 可以深入地研究两栖运动机理. 两栖多足机器人区别其他足式机器人的最大特点就是具备水陆两栖的运动性能. 虽然目前研究人员已经对足式机器人在陆地和水中的行走运动做了大量的研究工作, 但只有少数研究明确地考虑了运动学、动力学、能耗损失以及水中足式机器人的水动力学. 而且, 目前还没有人对足式机器人水下行走和陆上行走进行比较, 对水下多足机器人的运动模式研究也是少之又少^[1~4]. 因此, 对步行机器人水下行走方式的探索是极为重要的.

本文在前期样机研究的基础上^[5~8], 针对水

下行走的特点, 通过采用减轻重力、附加流体力的方法, 进行了两栖多足机器人在水中运动的力学分析; 并推导了两栖多足机器人在静水中单腿步行足摆动时的水阻力, 得到了关节力矩值, 简化了计算, 并提出了“蹬踏—漂浮”的水下运动模型.

2 静水中两栖多足机器人运动模型 (The dynamic model of amphibious multi-legged robot in static water)

一只生物蟹从陆地运动到水中时, 在浮力的作用下, 其有效重量将减小. 这些力的变化对生物蟹的运动速度及平稳性产生了巨大影响. 将生物蟹在水介质和空气介质中的运动力学特性进行对比, 会发现生物蟹在水中行走过程中: ①以较

慢速率的步态行走, 消耗较低的能量; ②呈现出更多可变的动力学; ③采用比陆地行走时更宽的姿态来抵制流体力, 从而增加其平稳性. 研究表明, 螃蟹在水中游动时八足伸展, 其足端间距比陆地上行走时大 19%, 减小了由于水力作用而倾翻的可能性.

2.1 两栖多足机器人在水中行走时的受力分析

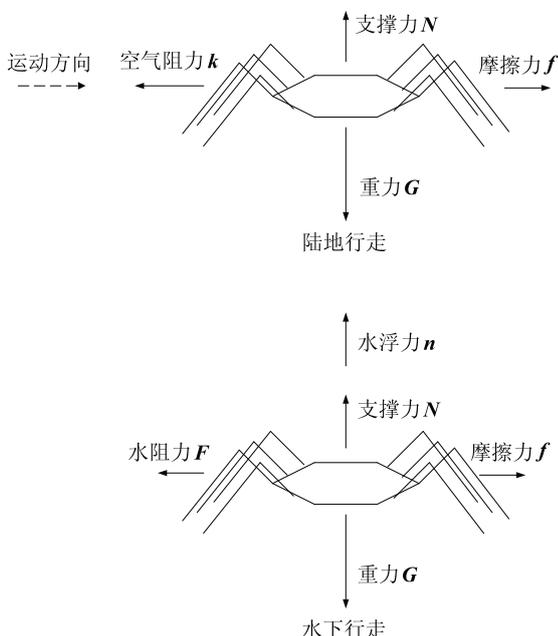


图 1 两栖多足机器人在陆地和水下行走受力分析

Fig.1 Forces analysis of terrestrial and underwater walking of the multi-legged robot

同在空气介质环境中一样, 两栖多足机器人在水下环境中受到介质浮力和流体阻力的作用. 两栖多足机器人在水下行走过程中, 浮力降低了重力的作用效果. 但水的介质密度比空气的大很多 (约 833 倍), 介质浮力、流体阻力也增大了 833 倍, 因此其动力学特性不同于空气介质, 不能按气体环境对其进行分析. 这里提出一种分析两栖多足机器人在水中受力的简捷方法, 就是在空气介质环境动力学的基础上叠加水环境所带来的影响. 两栖多足机器人所受到的浮力、重力与机械本体有关参数不会发生改变, 将二者合成水环境的等效重力, 再叠加与运动速度相关的水阻力, 就构成了两栖多足机器人的受力模型, 如图 1 所示.

按照基础流体力学计算两栖多足机器人所受的水阻力, 见式 (1):

$$F = C_R \times \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (1)$$

式中: F 为水阻力, C_R 为水阻系数, ρ 为水密度, V

为相对水流速度, S 为等价面积.

2.2 两栖多足机器人在水中行走的跳跃模型以及对步态的影响

像包括人类在内的许多动物一样, 螃蟹以相对质心的倒立摆结构进行交替迈步. 倒立摆模型常被用在仿生机器人的行走分析中^[9]. 关于机器人是否能够稳定行走, 可以用一个简单模型进行预测, 弗劳德数是离心力与重力的比值, 以 Fr 表示, 见式 (2):

$$Fr = v^2 / (gl) \quad (2)$$

式中: v 为动物的前进速度, g 为重力加速度常数, l 为动物的有效腿长度.

理论上, 当离心力等于或超过重力 ($Fr \geq 1$) 时, 动物就不能用倒立摆结构行走, 并且转变成一种非正常行走步态. 水中的浮力作用使螃蟹的重力大约降低了 10 倍 (螃蟹的密度约为 $1.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). 那么, 根据这一简单的模拟, 螃蟹在水中即使以较慢的步态行进, 也将被看作为类似于陆地上跑动的步态 (就像在小跑、飞驰和忙碌时所见的运动, 这种步态被定义为跳跃运动), 这会影响到其自身的稳定性. 所以, 为了保证两栖多足机器人在水中以稳定的姿态行走, 必须调整其水下步态.

通过上述的力学分析可以计算出两栖多足机器人水环境行走 (不倾翻) 速度的范围:

$$\begin{cases} f = N \times u \\ N = mg - mv^2/l \\ f \geq F \end{cases} \quad (3)$$

结合式 (2) 解得:

$$v \leq \sqrt{\frac{2mgul}{2mu + C_D S \times l}} \quad (4)$$

在陆地环境中, 极限情况为重力与离心力平衡, 则有:

$$mg \geq mv_{\text{air}}^2/l \quad (5)$$

即:

$$v_{\text{air}} \leq \sqrt{g \times l} \quad (6)$$

显然:

$$v_{\text{air}} > v \quad (7)$$

如果两栖多足机器人在水中行走时采用陆地行走步态, 将会减慢两栖多足机器人在水中的行进速度. 所以, 为保证两栖多足机器人在水下高效快速行走, 需要改变其行走方式.

对于在水中行走的两栖多足机器人，采用陆地行走姿态具有比在陆地上更大的倾翻危险。原因是当两栖多足机器人的身体翻转力矩超过稳定力矩时，它的身体将绕支撑腿翻转，两栖多足机器人的受力示意图见图 2。

假设所有力均作用于两栖多足机器人的质心，则翻转力矩等于水阻力 (F) 乘以其到支撑腿支点的距离 L_2 ，而稳定力矩等于两栖多足机器人的有效重力 ($G - N - n$) 乘以其到支撑腿支点的水平距离 L_1 。由于水的密度比空气的密度大，两栖多足机器人的翻转力矩增大 (更大的介质阻力)，稳定力矩减小 (更大的浮力)，故两栖多足机器人在水中行走时，其倾翻的可能性将增大。两栖多足机器人可以通过采取更稳定的身体姿态来降低更大的倾翻可能性。一方面采取更宽泛的身体姿态来增加稳定力矩，另一方面采取能够减小身体水阻力和上升力的身体姿态来减小翻转力矩。

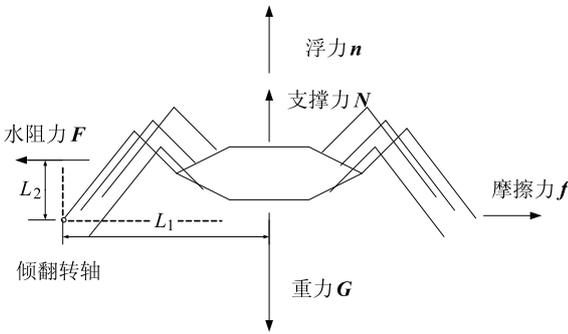


图 2 水中两栖多足机器人受力图

Fig.2 Force diagram of underwater amphibious multi-legged robot

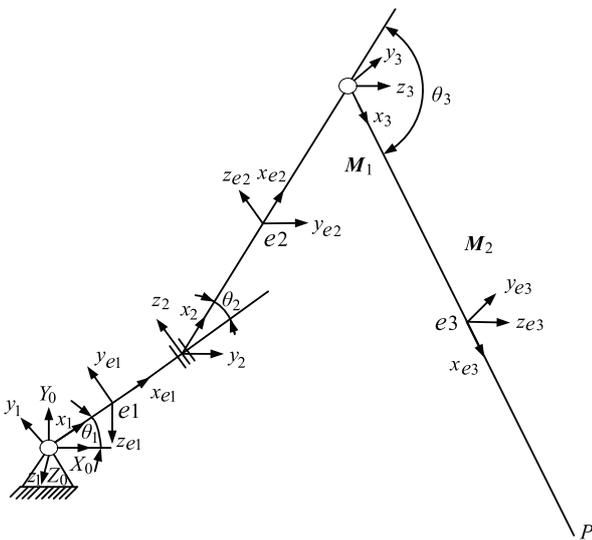


图 3 水下单足动力学分析

Fig.3 Dynamic analysis of single underwater foot

2.3 静水阻力对步态的影响

步行足在静水中摆动时，除受自身重力作用及关节驱动力矩外，还要受到水中波浪阻力的作用。对小构件 (即构件直径尺度相对入射波的波长较小的结构物) 采用 Morison 等 1950 年提出的方法计算波浪力^[10]。Morison 方程从根本上说是经验公式，以波浪质点速度、加速度和柱体直径为参数计算各水深处波浪力，然后沿柱长积分得到桩柱波浪力。

在稳定流中，单位长度沿垂直速度方向受的波浪力为：

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D D |U| U \quad (8)$$

式中： ρ 为流体密度， C_D 为拖曳力系数，它集中反映了因流体的粘滞性而引起的粘滞效应，与雷诺数 Re 和柱面粗糙度 δ 有关系。 D 为管径， U 为流速。

这里，考虑两栖多足机器人在静水中单腿步行足摆动时的受力情况，则 U 为关节摆动时液体相对关节转动的速度。

由以上分析得到，摆腿关节在静水中转动时，受到的阻力方向与线速度方向在同一直线上，但方向相反，且受到胫节和股节上的水阻力矩 M_1 和 M_2 的合力矩作用，两栖多足机器人水下单足动力学分析如图 3 所示。其中 M_1 、 M_2 由式 (9) 和 (10) 确定， M_{1z} 、 M_{2z} 为 M_1 、 M_2 在 Z 轴方向上的投影， l_2 、 l_3 是腿部摆动关节和小腿关节的长度。

$$M_1 = \int_0^{l_2} R \times F = \int_0^{l_2} R \times 0.5 \rho C_D D |R \times \omega| (R \times \omega) dr$$

$$R = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \omega = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \quad R \times \omega = \begin{bmatrix} 0 \\ -r\omega_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$|R \times \omega| = r\omega_2, \quad R \times (R \times \omega) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -r^2\omega_2 \end{bmatrix}$$

$$M_1 = 0.5 \rho C_D D \omega_2$$

$$= \int_0^{l_2} r (R \times (R \times \omega)) dr$$

$$= 0.5 \rho C_D D \omega_2 \begin{bmatrix} \int_0^{l_2} 0 dr \\ \int_0^{l_2} 0 dr \\ \int_0^{l_2} -r^3 \omega_2 dr \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1z} &= 0.5\rho C_D D \omega_2 \int_0^{l_2} -r^3 \omega_2 dr = -0.125\rho C_D D \omega_2^2 l_2^4 \\ \mathbf{M}_2 &= \int_0^{l_3} \mathbf{R}' \times \mathbf{F} = \int_0^{l_3} \mathbf{R}' \times 0.5\rho C_D D |\mathbf{R}' \times \boldsymbol{\omega}| (\mathbf{R}' \times \boldsymbol{\omega}) dr \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{o}_2\mathbf{o}_3$ 为坐标系 \mathbf{o}_2 、 \mathbf{o}_3 坐标原点间的向量.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}' &= (\mathbf{o}_2\mathbf{o}_3 + \mathbf{T}_3^2\mathbf{R}), \quad \mathbf{o}_2\mathbf{o}_3 = \begin{bmatrix} l_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_3^2\mathbf{R} &= \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ s_3 & c_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_3r \\ 0 \\ s_3r \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}' &= \mathbf{o}_2\mathbf{o}_3 + \mathbf{T}_3^2\mathbf{R} = \begin{bmatrix} l_2 + c_3r \\ 0 \\ s_3r \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}' \times \boldsymbol{\omega} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -(l_2 + c_3r)\omega_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |\mathbf{R}' \times \boldsymbol{\omega}| = (l_2 + c_3r)\omega_2 \\ \mathbf{R}' \times (\mathbf{R}' \times \boldsymbol{\omega}) &= \begin{bmatrix} -(l_2 + c_3r)\omega_2 s_3r \\ 0 \\ -(l_2 + c_3r)(l_2 + c_3r) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{M}_2 = 0.5\rho C_D D (l_2 + c_3r) \omega_2 \cdot$$

$$\int_0^{l_3} [- (l_2 + c_3r)\omega_2 s_3r \quad 0 \quad - (l_2 + c_3r)(l_2 + c_3r)]^T dr$$

$$\mathbf{M}_{2z} = 0.5\rho C_D D l_2 \omega_2 + 0.5\rho C_D D c_3 \omega_2 \cdot$$

$$\begin{aligned} &\int_0^{l_3} - (l_2 + c_3r)(l_2 + c_3r) r dr \\ &= \frac{1}{2}\rho C_D D l_2 \omega_2 - \frac{1}{2}\rho C_D D c_3 \omega_2 \cdot \\ &\quad \left(\frac{1}{2}l_2^2 l_3^2 + \frac{2}{3}l_2 c_3 l_3^2 + \frac{1}{4}c_3^2 l_3^4 \right) \end{aligned}$$

则步行足在静水中摆动状态下, 摆腿关节受到水的阻力矩为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_{1z} + \mathbf{M}_{2z} \\ &= -\frac{1}{4}\rho C_D D \omega_2^2 l_2^4 + \frac{1}{2}\rho C_D D l_2 \omega_2 - \\ &\quad \frac{1}{2}\rho C_D D c_3 \omega_2 \left(\frac{1}{2}l_2^2 l_3^2 + \frac{2}{3}l_2 c_3 l_3^2 + \frac{1}{4}c_3^2 l_3^4 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (10) 及 (11) 可知, 水阻力的大小与运动速度大小的平方成正比. 若腿部摆动频率超过水下最优化步态频率, 两栖多足机器人所受的水阻

力就会急剧增大, 并且效率及水下行进速度也会随之降低. 因此, 水阻力限制了水下运动的速度, 也就是说, 相对陆地行走而言, 水下步态的速率明显要低. 为此, 我们提出了不同于陆地上行走的水下“蹬踏—漂浮”步态.

2.4 两栖多足机器人的水下步态

在以上分析的基础上, 我们提出了一种全新的水下步态^[11]: “蹬踏—漂浮”步态. 这种步态不同于陆地上的双四足步态, 其步行足运动速率明显减小.

双四足步态将两栖多足机器人的八条腿分为两组, 轮流与地面接触. 在运动过程中, 总有一组腿触地. 每组腿的行走周期中, 支撑相的时长与摆动相的时长相同.

而对于水下“蹬踏—漂浮”步态, 一个行走周期里的支撑相的时长明显小于摆动相, 并且, 在每个运动周期中的部分时间内, 两栖多足机器人着地足数目不足四个, 甚至一个也没有, 整个两栖多足机器人脱离地面, 处于水中浮游状态. 我们在两栖多足机器人水下实验中就采用了此种步态. 为检测足端是否接触地面, 在各足端处安装力传感器, 通过采集受力数据判断行走方式.

2.5 两栖多足机器人水环境试验

两栖多足机器人水中行走的环境十分复杂, 需要多次对它进行配重和修改关节运动参数. 在完成了陆地试验后, 开始着手两栖多足机器人水下环境行走的试验, 用以对所提出的水下“蹬踏—漂浮”运动模型加以验证.



图4 两栖运动实验平台

Fig.4 Experimental platform for amphibious motion

两栖多足机器人在水下运动过程中采集的力觉数据首先被存入 flash 中, 试验完成后再将数据

传给计算机作分析处理. 浅水两栖实验环境如图4所示.

浅水实验环境参数:

①水质为淡水, 水深0.6 m, 沙面不平整度1~2 cm;

②水下斜坡角度20°, 坡面不平整度1~2 cm.

3 水下爬行试验 (The experiment of underwater crawling)

对两栖多足机器人的水下行走模型进行充分论证后, 就需要转到真实水环境中进行最终的两栖试验. 将两栖多足机器人置于上述的浅水环境中, 通过对两栖多足机器人落地足的力觉曲线的分析和对实际的步速的检测来调整步行参数. 下面分别对两种步行模式进行了分析和对比, 图5为两栖多足机器人水下横行过程照片.

(1) 以陆地双四足行走模式进行水下行走时的各足力觉曲线如图6所示, 可以看出与陆上行走相比, 两栖多足机器人在水中行走时, 各足受力均减小到10 N左右. 这是因为两栖多足机器人在水下的等效重力为4 kgf, 均匀分配到支撑相的四条腿上. 但除第6、8足在行走过程中的周期和幅值变化不大外, 其它足均出现幅值较大幅度的不确定变化现象. 第1、4、5足都出现了大于150%的力冲击, 甚至达到20 N; 同时第1、2、3、7足出现力值长时间保持为零的情况, 说明这段时间一直没有着地; 力曲线也有较大的毛刺. 以上各种情况反映出以陆上行走模式进行水下行走时, 两栖多足机器人稳定性很差, 而且通过录像也可以观察到, 两栖多足机器人行走时常出现打滑、抖动

甚至停滞不前的情况, 整个水池中的水也因两栖多足机器人的行走而被搅动. 综上所述说明陆上行走模式不适于水下行走, 因为两栖多足机器人在水下处于一种少重力的状态, 为保持两栖多足机器人行走的平稳性, 必须改变两栖多足机器人的行走方式.

(2) 以水下“蹬踏—漂浮”行走模式进行水下行走时的各足力觉曲线如图7所示. 在这种模式下, 两栖多足机器人行走周期加长, 一个行走周期中, 支撑约占30%时长, 摆动约占70%. 在每个运动周期中, 大约有两个占运动周期10%时长的时段, 在这两个时段中, 两栖多足机器人不是8足着地, 而是只有少于4个足着地, 甚至整个机器人脱离地面, 浮游在水中, 没有着地足. 从图中可以看出, 两栖多足机器人各足受力均匀, 且呈周期变化, 其幅值稳定在10 N左右, 这说明两栖多足机器人行走姿态较前一种方式平稳了很多. 从行走的录像也可以看出, 两栖多足机器人步行足运动速率变小, 但机器人行进速度明显加快, 同时水池中水波动幅度大的情况也得到大大改善.

4 结论 (Conclusion)

本文针对生物蟹水下运动特点, 从动力学模型分析及样机实验两个方面入手, 对两栖多足机器人的两栖步态进行了研究, 通过分析实验数据可以证明此前的理论分析是正确的, 并得出以下结论:

(1) 由于水环境的浮力作用, 生物蟹的有效重力明显降低 (重力与浮力的合力), 导致其水下步态明显不同于陆上步态, 具有三个明显的特征.

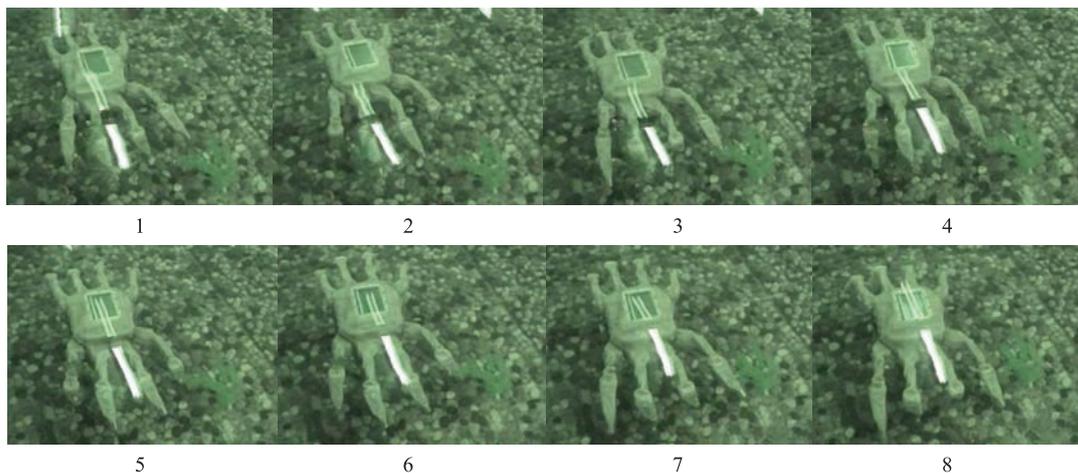


图5 两栖多足机器人水下行走过程

Fig.5 The process of the amphibious multi-legged robot's underwater walking

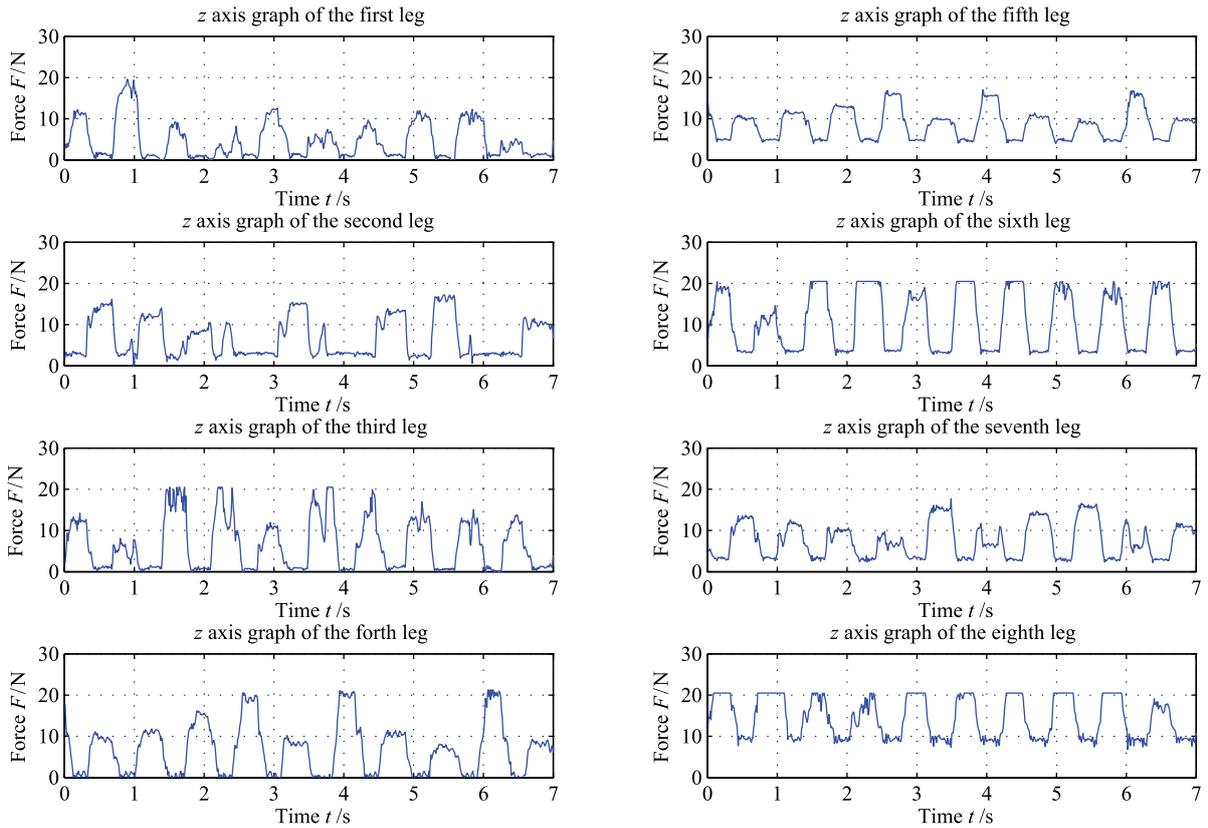


图 6 按照陆地行走步态进行水下行走时的各足力觉曲线

Fig.6 Foot force curves of underwater walking with the gait of land walking

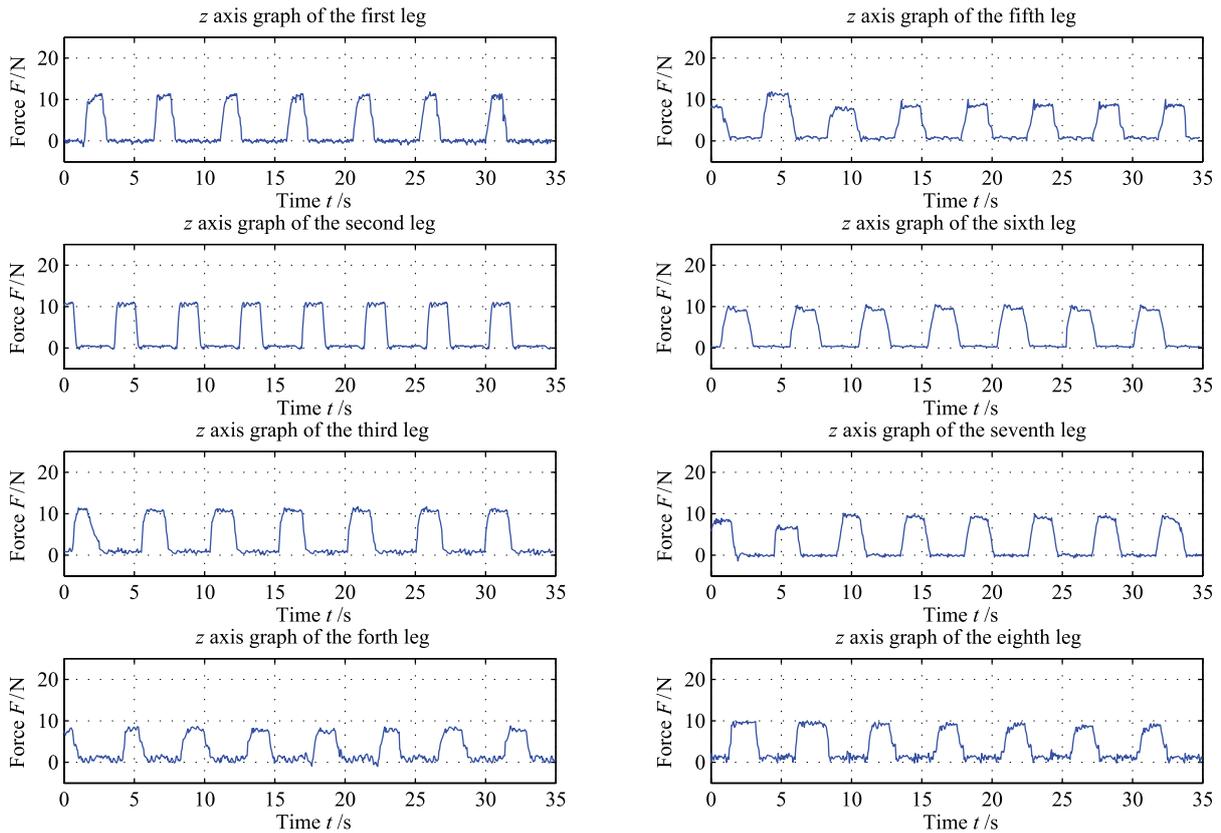


图 7 按照“蹬踏—漂浮”步态进行水下行走时的各足力觉曲线

Fig.7 Foot force curves of underwater walking according with the “hoof-floating” gait

(2) 利用水动力学对水中两栖多足机器人进行了受力分析, 研究了静水力对机器人步态的影响. 这种分析为其他水下足式机器人研究提供了可借鉴的方法.

(3) 在以上结论的基础上, 提出了两栖多足机器人“蹬踏—漂浮”的水下运动步态, 为两栖多足机器人的水下运动提供了理论模型.

(4) 进行了两栖多足机器人的水下步行实验, 对比了两种步态的运动效果, 证明了“蹬踏—漂浮”步态的可行性及其快速和稳定的优势.

参考文献 (References)

- [1] Alexander R M. Optimization and gaits in the locomotion of vertebrates[J]. *Physiological Reviews*, 1989, 69(4): 1199~1227.
- [2] Barnes W J P. Leg co-ordination during walking in the crab[J]. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 1975, 96(3): 237~256.
- [3] Blake R W. Crab carapace hydrodynamics[J]. *Journal of Zoology, Series A*, 1985, 207(3): 407~423.
- [4] Cavagna G A, Zamboni A, Faraggiana T, *et al.* Jumping on the moon: Power output at different gravity values[J]. *Aerospace Medicine*, 1972, 43(4): 408~414.
- [5] Wang L Q, Chen D L, Sun L, *et al.* The research on bionic crab-like robot prototype[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*[C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005. 2017~2021.
- [6] 陈东良, 孟庆鑫, 王立权. 仿生机器蟹变结构力觉传感器的设计及数据处理 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(1): 118~122.
- Chen Dong-liang, Meng Qing-xin, Wang Li-quan. Design and data disposal of structure-alterable force sensor on bionic crab-like robot[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(1): 118~122.
- [7] 陈东良, 孟庆鑫, 王立权, 等. 仿生机器蟹足力觉检测系统 [J]. *传感器与微系统*, 2007, 26(2): 65~67, 70.
- Chen Dong-liang, Meng Qing-xin, Wang Li-quan, *et al.* Force detection system for bionic crab-like robot[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(2): 65~67, 70.
- [8] 王沐楠, 王立权, 孟庆鑫, 等. 两栖仿生机器蟹行走过程运动学研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, 24(2): 179~183.
- Wang Mo-nan, Wang Li-quan, Meng Qing-xin, *et al.* Kinematics of bionics crab walking process[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, 24(2): 179~183.
- [9] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 等. 六足移动式微型仿生机器人的研究 [J]. *机器人*, 2002, 24(5): 427~431.
- Xu Xiao-yun, Yan Guo-zheng, Ding Guo-qing, *et al.* Research on miniature hexapod bio-robot[J]. *Robot*, 2002, 24(5): 427~431.
- [10] 田宏升. 固定式海洋结构物载荷分析与研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- Tian Hong-sheng. Analysis of Wave Forces on Static Offshore Structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [11] 陈学东, 孙翊, 贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- Chen Xue-dong, Sun Yi, Jia Wen-chuan. Motion Planning and Control of Multilegged Walking Robots[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.

作者简介:

刘德峰 (1981-), 男, 博士生. 研究领域: 微小型机器人, 智能控制系统.