仿蝗虫跳跃机构设计与分析

尹军茂 陈殿生 沈 奇

(北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

摘 要: 以蝗虫跳跃特性为依据,设计出一种仿蝗虫弹跳机构并对其弹跳机理进行研究. 首先从生物学和机构运动学相结合的角度,对蝗虫的跳跃过程进行观察和分析,研究蝗虫后腿的跳跃机理,发现跳跃后腿膝关节在起跳过程中的重要作用. 利用虚拟样机建立蝗虫模型,对蝗虫的跳跃过程进行仿真. 根据蝗虫跳跃机理和后腿结构特点,基于提高能量利用率和弹跳效率原则,设计出一种单自由度的仿蝗虫跳跃机构模型,对该机构在起跳阶段进行运动性能分析,通过与蝗虫跳跃仿真结果进行比较,证明该跳跃机构具有与蝗虫弹跳后腿近似的力学特性. 最后通过机构的样机实验验证了分析结果,为进一步研究仿生高效的柔性跳跃机构奠定基础.

关 键 词: 跳跃机器人; 蝗虫跳跃机理; 弹跳机构; 机构分析; 机构设计

中图分类号: TH 113.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1348-06

Design and analysis of locust-like jumping mechanism

Yin Junmao Chen Diansheng Shen Qi

(Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A jumping mechanism based on jump characteristics of locust was presented. By biological observation and kinematic analysis of locust jump, the key effect of locust's hind leg knee on the jump performance was discovered, and a simplified dynamic model of locust was built to simulate locust take-off. According to the simplified locust model and physiological structure of the locust's hind leg, a 1 DOF locust-based jumping mechanism was put forward. The kinematical analysis of the mechanism during take-off was implemented and the ground reaction force on hind leg of locust was compared with that of the locust jump simulation. The results show that the mechanism has the similar mechanical properties as locust. Finally, the prototype experiment verifies the analysis results. It provides a valued basis for further research of locust-like efficient flexible jumping mechanism.

Key words: jumping robot; locust-like jumping mechanism; hopping mechanism; analysis of mechanism; mechanical design

地面移动机器人的地形适应性是其重要特性之一. 跳跃运动形式本身决定了其相对跳跃对象自身规模具有更强的越障能力,为地面移动机器人的地形适应性提供了新的解决思路. 跳跃机器人可以跨越障碍,躲避危险,还具有运动灵活、地面适应能力强的特点,逐渐成为新的研究热点.

生物的跳跃为仿生跳跃机构的设计提供了灵感. NASA 喷气动力实验室 JPL 与加利福尼亚技术学院联合最早研制了一种蛙形弹跳机,采用六杆弹簧机构实现了良好的仿生跳跃[1],但没有对

收稿日期: 2012-12-10; **网络出版时间**: 2013-04-16 11:40

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130416.1140.005.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075014); 教育部博士点基金资助项目(20121102110021); 北京航空航天大学博士生创新基金资助项目(YWF-12-RBYJ-017)

作者简介: 尹军茂(1985-),男,陕西咸阳人,博士生,junmaoy@163.com.

结构仿生的理论做深入研究. 近年来,仿生跳跃机器人成为一个热点研究方向. 文献[2]利用弹性储能元件和四杆机构研制了质量仅为 7 g 的微型仿蚂蚱跳跃机器人,弹跳高度可达体长的 27 倍. 文献[3]设计出一种仿青蛙跳跃机器人,以一个四杆弹簧机构作为弹跳机构,拥有类似于青蛙的跳跃性能和运动姿态. 文献[4]则以速度方向可操作度为跳跃性能的评价指标,提出了改善仿蛙跳跃机器人跳跃性能的优化方法. 文献[5]研制出一种人工筋驱动的机械蟋蟀,采用微气泵驱动人工筋,使机器人行走与弹跳,但是机构较复杂,能量效率低. 文献[6]研制了一种仿袋鼠弹跳机器人,可实现跳远度和跳高度的控制. 目前,仿生跳跃机器人在机构的柔性化、微型化以及柔性驱动等方面还存在较多问题. 根本原因在于仿生跳跃机理及相关材料、驱动等还未取得突破性进展.

蝗虫拥有优越的跳跃能力,用 9 ~ 10 mJ 的能量可跳 30 cm 高,70 cm 远,而用于驱动其躯体的肌肉组织的质量仅仅为其躯体总质量的4% ~ 5%[7-8]. 其弹跳机理研究对于仿生弹跳机构的设计有重要的参考价值. 文献[7]指出,在蝗虫的跳跃中,骨骼作为杠杆,关节为支点,而肌肉、筋腱提供动力;文献[8]则针对蝗虫后腿的膝关节组织结构进行了深入研究,采用解剖学的方法揭示了其膝关节在起跳中的运动机理. 生物学研究表明:蝗虫后腿膝关节是跳跃运动的核心,轻质坚硬的胫节和柔性化的跗节等组织特性是跳跃的重要保证. 一次成功的起跳需要后腿有足够大的蹬地力和与之相应的速度[9]. 因此,从生物机理上,蝗虫的组织结构本身具有跳跃的优势.

本文以蝗虫为研究对象,对其弹跳过程进行观察和研究,着重分析了蝗虫后腿的弹跳机理,并以此为依据设计简化实用的弹跳机构. 在仿生机构运动分析和虚拟样机仿真的基础上,以提高能量利用率和弹跳效率为原则,设计出一种简化的轻型仿生弹跳机构,并通过样机实验进行了验证,为下一步研究仿生柔性弹跳机构奠定了基础.

1　蝗虫跳跃机理与实验观测

采集健康活跃、体态均匀的东亚飞蝗 3 只进行测量,对蝗虫结构跳跃后腿构型、关节运动、肌肉、筋腱分布、跗肢的柔性等特征进行观测. 一个蝗虫的身体参数如表 1 所示.

1.1　后腿形态观测

蝗虫跳跃后腿分为腿节、胫节、跗节,之间各有关节连接,并通过基节、转节肌肉与躯体相连,如图 1 所示.

表 1　实验蝗虫的身体参数

参数项	数值/g	参数项	数值/mm
总质量 m	0.22	跗节长度 l_0	4.21
跗节质量 m_1	0.003	胫节长度 l_1	11.97
胫节质量 m_2	0.009	股节长度 l_2	13.27
股节质量 m_3	0.045	躯干长度 l_3	33.25
躯干质量 m_4	0.100	躯干质心 l	15.25

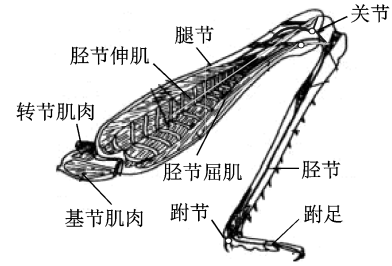
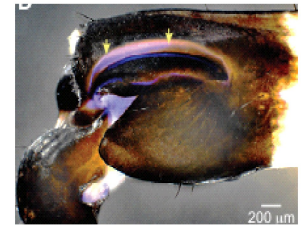
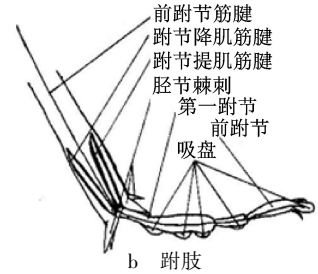


图 1　蝗虫后腿结构图

基节的活动观测表明其属于 2 自由度铰链,基节在基节肌肉和转节肌肉的驱动下可以做股骨的屈伸运动和收展运动. 膝关节由胫骨末端半包于股骨形成,嵌入在外骨骼内部的屈肌和伸肌相互作用驱动关节转动(图 2a). 屈伸时,膝关节中心有较小的轴心偏移,可使胫骨屈曲至与股骨完全重合. 跗足为环节结构,附着有吸盘,具有较大的柔度,通过跗节肌肉牵动可以屈伸(图 2b).



a　膝关节[8]



b　跗肢

图 2　蝗虫膝关节和跗肢的结构

1.2　跳跃实验观测

如图 3 所示,实验平台使用 FASTCAM-X 1280PCI 高速摄像机,设置 500 帧/s 的帧频进行拍摄;配有光源,环境温度约 25 ℃;跳跃测试平台背景置以坐标纸,便于分析蝗虫运动的位姿;平台使用 PC 机对采集的视频进行存储和分析.

针对高速摄像机拍摄的跳跃运动,对蝗虫整

个跳跃过程每隔 2 ms 进行拍摄,得到蝗虫跳跃过程的位置-时间图(图 4). 根据拟合结果可知,蝗虫跳跃过程中,垂直方向上高度的变化近似于抛物线运动.

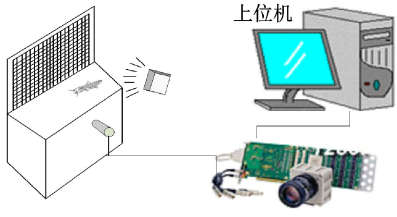


图 3 蝗虫跳跃实验平台

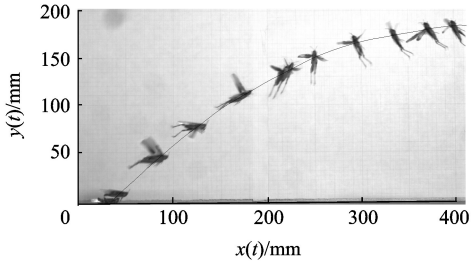
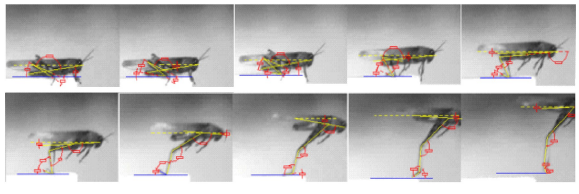


图 4 蝗虫跳跃过程及其轨迹拟合图

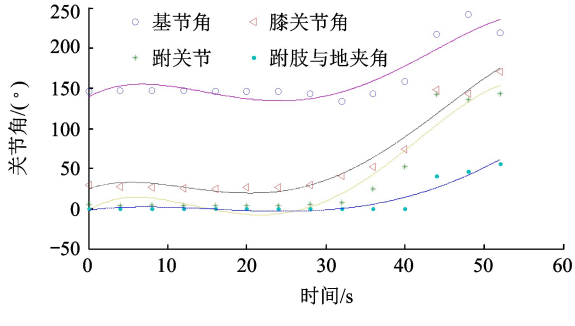
1.3 起跳阶段关节运动协调性及起跳姿态分析

蝗虫准备跳跃前要完成屈腿动作,如图 1 所示. 此时,腿节绕基节转动,胫节绕膝关节沿顺时针方向收缩,基节、关节的角度开始减小. 整个起跳准备过程耗时 30 ms.

起跳准备结束后,在 2 ms 内,蝗虫跳跃后腿处在绷紧状态下. 起跳时,在肌肉和筋腱的作用下,关节快速张开,在 22 ms 内从 0°增加到 160°,跗节和转节也迅速转动并与关节的转动保持协调,使整个身体以 45°的起跳角,近乎直线的从地面跃起. 起跳从准备到离地的姿态如图 5a 所示.



a 起跳姿态序列



b 关节运动曲线

图 5 蝗虫起跳姿态及关节运动规律

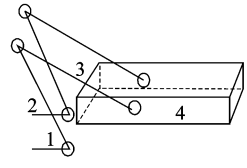
根据蝗虫跳跃的录像资料,测出各关节在蝗虫起跳时的角度变化值,拟合得到蝗虫起跳的关节角度变化规律如图 5b 所示. 计算得:起跳速度达到 3.4 m/s,在整个起跳阶段的 52 ms 内平均加速度达到 106.3 m/s^2,充分体现了蝗虫跳跃后腿结构的优越性.

由图 5b 可知,起始 0 ~ 30 ms 内,关节角度变化不大;在 30 ~ 52 ms,各关节迅速协调运动展开,产生起跳所需速度并调整姿态. 蝗虫起跳主要由胫节伸肌拉动胫节,使蝗虫身体在极短时间内获得较大的起跳速度,最终达到最大速度后跃离地面. 跗节和转节随之协调转动,前者的功能主要是保证附足与地面接触产生作用力,后者主要是保证跳跃过程的姿态平稳.

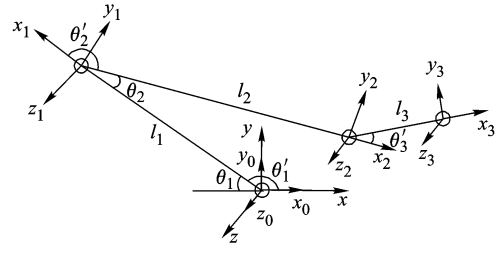
2 仿蝗虫弹跳机构建模分析及仿真

2.1 仿生弹跳机构动力学建模与分析

简化起见,蝗虫后肢各关节均可简化为 1 自由度的转动关节. 仿蝗虫弹跳机构由 4 个构件组成,分别为跗足 1、胫节 2、腿节 3、躯体 4,共有 3 个自由度,并呈现左右两侧对称. 构件 1 和构件 2 的连接处为跗节,构件 2 和构件 3 的连接处为关节,构件 3 和构件 4 的连接处为转节. 仿蝗虫跳跃机构模型如图 6a 所示,图 6b 为建立的机构 D-H 坐标系.



a 跳跃机构模型



b 弹跳机构 D-H 坐标系

图 6 蝗虫跳跃的刚体模型和机构简图

由图 6b 求得相邻关节坐标变换矩阵为

$$\boldsymbol{A}_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\pi-\theta_1) & -\sin(\pi-\theta_1) & 0 & l_1\cos(\pi-\theta_1) \\ \sin(\pi-\theta_1) & \cos(\pi-\theta_1) & 0 & l_1\sin(\pi-\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{A}_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2-\pi) & -\sin(\theta_2-\pi) & 0 & l_2\cos(\theta_2-\pi) \\ \sin(\theta_2-\pi) & \cos(\theta_2-\pi) & 0 & l_2\sin(\theta_2-\pi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{A}_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}_3^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1-\theta_2-\theta_3) & \sin(\theta_1-\theta_2-\theta_3) & 0 & m_x \\ -\sin(\theta_1-\theta_2-\theta_3) & \cos(\theta_1-\theta_2-\theta_3) & 0 & m_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中,(m_x, m_y)表示躯干质心的坐标,计算如下:

$$\begin{aligned} m_x &= l_3\cos(\theta_1-\theta_2-\theta_3) + l_2\cos(\theta_1-\theta_2) - l_1\cos\theta_1 \\ m_y &= -l_3\sin(\theta_1-\theta_2-\theta_3) - l_2\sin(\theta_1-\theta_2) + l_1\sin\theta_1 \end{aligned}$$

同理,转节正运动学分析结果为

$$\left.\begin{aligned} n_{2x} &= \cos(\theta_1-\theta_2) \\ n_{2y} &= -\sin(\theta_1-\theta_2) \\ o_{2x} &= \sin(\theta_1-\theta_2) \\ o_{2y} &= \cos(\theta_1-\theta_2) \\ a_{2z} &= 1 \\ X_{2q} &= m_x' = l_2\cos(\theta_1-\theta_2) - l_1\cos\theta_1 \\ Y_{2q} &= m_y' = -l_2\sin(\theta_1-\theta_2) + l_1\sin\theta_1 \\ n_{2z} &= o_{2z} = a_{2x} = a_{2y} = Z_{2q} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

膝关节运动学正解为

$$\left.\begin{aligned} n_{1x} &= -\cos\theta_1 \\ n_{1y} &= \sin\theta_1 \\ o_{1x} &= -\sin\theta_1 \\ o_{1y} &= -\cos\theta_1 \\ a_{1z} &= 1 \\ X_{1q} &= m_x'' = -l_1\cos\theta_1 \\ Y_{1q} &= m_y'' = l_1\sin\theta_1 \\ n_{1z} &= o_{1z} = a_{1x} = a_{1y} = Z_{1q} = 0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

采用拉格朗日方法建立仿蝗虫跳跃机器人动力学方程并对其动力学特征进行分析. 系统的总动能为

$$K = \sum_{i=1}^{3} K_i = \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{3} m_i v_{oi}^2 + \sum_{i=1}^{3} J_i w_i^2\right) \tag{7}$$

其中,K_i 为各肢体的动能;v_{oi}为各肢体的质心速度($v_{oi}^2 = V_{xi}^2 + V_{yi}^2, i=1,2,3$);$w_i$ 为各肢体的角速度($w_i = \dot{\theta}_i, i=1,2,3$);$J_i$ 为各肢体的转动惯量.

取地面为零势能线,则系统的总势能:

$$V = \sum_{i=1}^{3} V_i = V_1 + V_2 + V_3 \tag{8}$$

式(8)中

$$\begin{aligned} V_1 &= m_1 g l_1 \sin\theta_1 \\ V_2 &= m_2 g(-l_2\sin(\theta_1-\theta_2) + l_1\sin\theta_1) \\ V_3 &= m_3 g(-l_3\sin(\theta_1-\theta_2+\theta_3) - l_2\sin(\theta_1-\theta_2) + l_1\sin\theta_1) \end{aligned}$$

分别代表各肢体的势能. 则仿蝗虫跳跃机构系统动力学方程的拉格朗日函数为

$$L = K - V \tag{9}$$

将动能方程和势能方程代入拉格朗日函数做微分处理,则得到各关节的输入力矩:

$$M_i = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \qquad i = 1,2,3 \tag{10}$$

2.2　动力学数值算例分析

为了揭示蝗虫跳跃的动力学特性,分析其起跳阶段地面作用力矩和各关节所需的驱动力矩的变化,在仿生运动条件下,进行蝗虫起跳动力学数值计算.

起跳阶段蝗虫后腿的关节角如图 5 所示. 结合表 1 的实验蝗虫的身体参数,估算并给定跗节惯量 $I_1 = 2\times10^{-11}$ kg·m^2,胫节惯量 $I_2 = 2.2\times10^{-9}$ kg·m^2,股节惯量$I_3 = 6.6\times10^{-9}$ kg·m^2,躯干惯量 $I_3 = 1.3\times10^{-8}$ kg·m^2. 数值计算步骤如下:首先对起跳阶段蝗虫后腿各关节角度的时序进行最小二乘拟合,得出其各关节运动函数;其次,利用关节运动函数求解其角速度和角加速度;最后,将蝗虫身体参数和后腿运动学特征代入上述动力学分析结果,利用 Matlab 软件实现数值解算. 图 7 为计算所得的蝗虫后腿各关节在起跳瞬间的力矩变化曲线.

图 7 表明,初始收缩的阶段调整起跳姿态后,

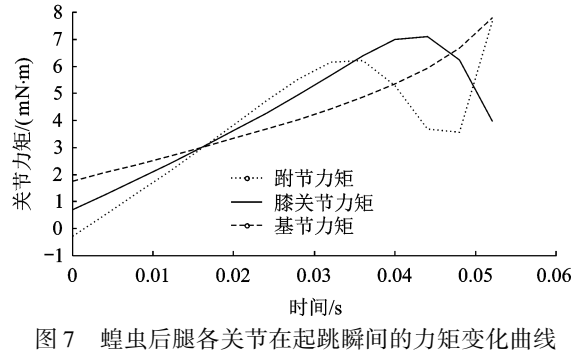


图 7　蝗虫后腿各关节在起跳瞬间的力矩变化曲线

初始的力矩用以维持该初始姿态. 起跳阶段,关节力矩连续迅速增大,以产生起跳所需的初速度. 在此之后的腾空瞬间,地面作用消失. 由于空中阶段为非完整约束状态的姿态调整动力学,故该动力学分析仅适用于起跳离地前的阶段.

2.3 起跳阶段动力学仿真

根据简化后的结果,建立如图 8 的模型,以进一步验证上述分析. 根据实验过程中所获得的数据,设定躯干、股骨和胫骨均为匀质刚杆,质量分别设为 1.5 g,0.2 g 和 0.2 g,跗节质量忽略.

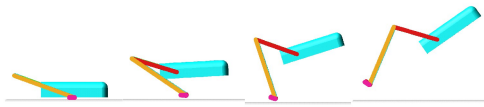


图 8 蝗虫模型虚拟样机及仿真跳跃过程图

在虚拟样机中对跳跃过程进行仿真(图 8),获得了身体位移与地面作用力的关系,如图 9 所示.

图 9 表明了蝗虫起跳阶段地面的作用力随着蝗虫身体位移的变化关系. 由图 9 知,起跳初始,蝗虫作用在地面上的力很小(图中对地面的作用力包括了蝗虫的重力),随之作用力快速达到峰值,然后迅速减小为 0,并脱离地面完成起跳. 完全离地后,由于重力因素力值呈负数.

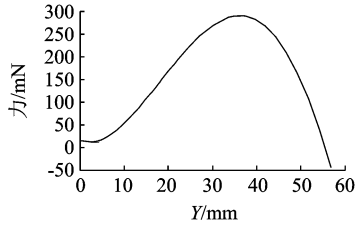


图 9 起跳时垂直受力随身体垂直位移 Y 变化曲线

3 弹跳机构设计与实验验证

3.1 弹跳机构的设计

蝗虫弹跳后腿结构比较复杂,完全模仿其弹跳结构,会大大增加驱动器以及其他耗能元件的数量. 而机构中驱动器数量越多,电机功率密度越低,弹跳效率越差. 同时由于驱动器数量的增多会导致本体重量的增大,对跳跃机器人弹跳能力有显著影响. 因此需要对蝗虫的弹跳后腿结构进行简化,降低其自由度数,同时还要考虑蝗虫弹跳结构的仿生性. 简化过程如下:

1) 利用拉簧模拟蝗虫腿节中的柔性肌肉,即用拉簧代替蝗虫胫节伸肌作为弹跳机构的储能元件;

2) 将腿节略去,利用拉簧连接原腿节两端,同时在胫节中间处与身体设置 1 个转动副,转动副与身体铰接,以达到降低自由度数的目的,如图 10 所示.

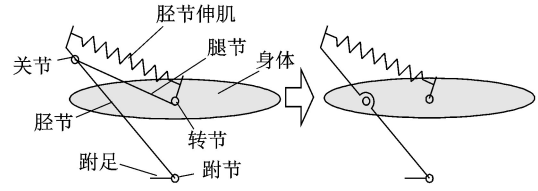


图 10 仿生弹跳机构的简化

3.2 弹跳机构的力学分析

假设模型中所有的杆件均为匀质刚性,均以转动副连接. 由于蝗虫在起跳前、后足跗节均与地面处于稳定附着状态,相当于前后腿的胫节与地面以转动副的形式联结,所以杆件模型中将跗节省去. 如图 11 所示,设水平方向的距离为 x,垂直方向为 y. 根据图 11,建立关系式 $x^2+y^2=l^2$,所以

$$y=\sqrt{l^2-x^2} \tag{11}$$

对式(11)进行微分,可以得到

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}y=-y/\sqrt{l^2-y^2} \tag{12}$$

设弹簧的力为 F_x,可以近似认为是水平的,弹跳时地面对机构的力为 F_y,近似认为是垂直向上的,根据能量守恒定律,则

$$F_x\mathrm{d}x=F_y\mathrm{d}y \tag{13}$$

将式(12)代入式(13)中,可得

$$F_y=F_x\mathrm{d}x/\mathrm{d}y=k(x-S_0)/(\mathrm{d}y/\mathrm{d}x)=$$
$$ky(1-S_0/\sqrt{l^2-y^2}) \tag{14}$$

其中,k 为弹簧弹性系数;S_0 为弹簧原长. 当 $k=100\ \mathrm{mN/mm}$,$S_0=70\ \mathrm{mm}$,$l=60\ \mathrm{mm}$ 时,可以得到 F_y 随 y 变化的关系,见图 12.

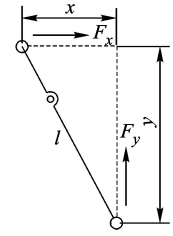


图 11 跳跃机构

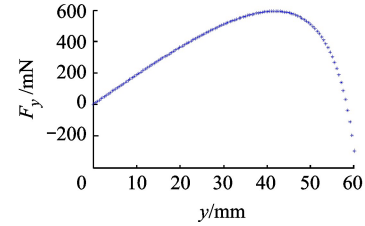


图 12 起跳高度与地面接触力关系

可以看出,该构型的简化机构起跳阶段与地面接触力和图 9 的仿真结果趋势一致. 在起跳阶段初期,与地面的接触力很小,随着跳跃的进行,与地面的接触力逐渐增大至最大值,随着机构跃离地面,与地面的接触力迅速下降并最终减为零. 拥有该特点的跳跃方式具有良好的跳跃效果和较高的能量利用率,因此,认为该机构拥有近似于蝗虫跳跃的力学特性.

针对上述设计,采用单弹簧驱动方式显然属

于欠驱动. 为进一步揭示弹簧驱动与地面反力的关系,需要对弹跳机构进行受力分析,见图 13.

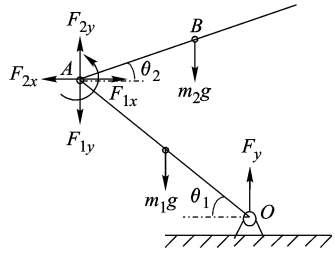


图 13　弹跳机构受力分析

对杆 2 进行受力的动平衡计算:

$$\left.\begin{aligned} F_{2y} - m_2 g &= m_2 a_{2y} \\ F_{2x} &= m_2 a_{2x} \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

其中,F_{2x},F_{2y}为关节 A 处两杆相互作用力的水平和垂直分量;a_{2x},a_{2y}分别为杆 2 质心加速度的水平和垂直分量. 对杆 1 进行受力和力矩的动平衡计算:

$$F_y - m_1 g - F_{1y} = m_1 \ddot{\theta}_1 \frac{l_1}{2}\cos\theta_1 \tag{16}$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + M + m_1 g \frac{l_1}{2}\cos\theta_1 = F_y l_1 \cos\theta_1 \tag{17}$$

由式(16)~式(17)推导得到

$$F_y = F_{1y} + m_1 g + m_1 \ddot{\theta}_1 \frac{l_1}{2}\cos\theta_1 \tag{18}$$

$$F_y = \frac{J_1 \ddot{\theta}_1 + M}{l_1 \cos\theta_1} + \frac{1}{2} m_1 g \tag{19}$$

另外,根据 A 点受力的相互作用有 $F_{1y} = F_{2y}$,故将式(15)代入式(18)得

$$F_y = (m_1 - m_2) g + m_1 \xi_1 \frac{l_1}{2}\cos\theta_1 - m_2 a_{2y} \tag{20}$$

$$a_{2y} = \xi_1 l_1 \cos\theta_1 + \frac{1}{2}\xi_{21} l_2 \cos\theta_2 \tag{21}$$

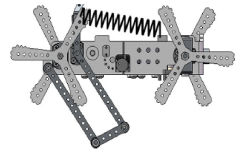
整理可得

$$\ddot{\theta}_1 \cos\theta_1 \cdot \left(\frac{m_1}{2} - m_2\right) l_1 - \frac{J_1 \ddot{\theta}_1 + M}{l_1 \cos\theta_1} = \ddot{\theta}_2 \cos\theta_2 \cdot \frac{m_2 l_2}{2} + \left(\frac{m_1}{2} - m_2\right) g \tag{22}$$

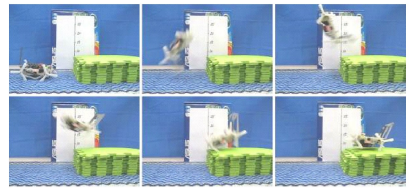
式(22)表明,该欠驱动机构在驱动力矩 M 确定时,机构运动形式具有确定性. 因此,由式(19)知,θ_1,$\ddot{\theta}_1$ 均取决于机构参数和驱动力矩 M. 显然,为产生足够大的地反力需要的驱动力矩将很大. 为此,将驱动电机较长时间的做功采用弹簧存储,并瞬间释放,能更高效的满足起跳的动力学要求. 而起跳姿态全部位姿时的地反力则可以通过式(19)和式(22)计算出.

3.3　实验验证

为了验证上述设计的可行性,设计一种简易弹跳机构,并配置在移动平台的小车上[10],其结构与弹跳实验如图 14 所示. 实验测试的跳跃数据如表 2 所示.



a　弹跳机构



b　弹跳实验

图 14　弹跳机构验证实验

表 2　跳跃高度实验数据

时间 t/s	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16
高度 h/cm	0	1	38	98	159
时间 t/s	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36
高度 h/cm	203	145	115	102	100

实验采用弹跳机构顺利跳上 8 cm 的台阶,耗时 0.36 s. 常规电机驱动较难实现弹跳所需的瞬时爆发力,实验验证了所设计弹跳机构采用弹簧延时储能、瞬时释放来实现机构快速起跳的可行性.

4　结　论

通过对蝗虫跳跃过程的观察,对蝗虫弹跳机理进行研究,分析了后腿起跳阶段的运动和动力学,在虚拟样机中对蝗虫跳跃的过程进行仿真,结果显示与蝗虫后腿的力学效果近似,证明了该机构拥有类似于蝗虫的跳跃性能. 根据蝗虫跳跃机理和后腿结构特点,基于提高能量利用率和弹跳效率原则,设计出一种单自由度的仿蝗虫跳跃机构模型. 将单自由度的仿蝗虫弹跳机构搭载于移动机器人平台,通过样机实验验证了分析结果和设计方案的可行性,为进一步研究仿生高效的柔性跳跃机构奠定基础.

(下转第 1359 页)

on a new servo valve direct driven by piezoelectric actuator using hydraulic amplification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2013,49(2):151-158 (in Chinese)

[6] 付永领,祁晓野. AMEsim 建模与仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006
Fu Yongling,Qi Xiaoye. AMEsim modeling and simulation [M]. Beijing:Beihang University Press 2006 (in Chinese)

[7] 吴帅,康荣杰,俞军涛,等. VCM-DDV 建模与控制仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):342-345
Wu Shuai, Kang Rongjie, Yu Juntao, et al. Modeling of VCM-DDV and control simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010,36(3):342-345 (in Chinese)

[8] Al-Bender F, Lampaert V, Swevers J. The generalized maxwell-slip model:a novel model for friction simulation and compensation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11):1883-1887

[9] Carlos C D W, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control of systems with friction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1995,40(3):419-425

[10] Padthe A K, Oh J H, Bernstein D S. On the lugre model and friction-induced hysteresis [C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA, IEEE,2006:3247-3252

[11] Tan Yaolong, Chang Jie, Tan Hualin. Adaptive backstepping control and friction compensation for AC servo with inertia and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2003,50(5):944-952

[12] Zhang Tao, Ge Shuzhi, Hang C C. Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design[J]. Automatica,2000,36(12):1835-1846

(编　辑:刘登敏)

(上接第 1353 页)

参考文献 (References)

[1] Kaplan M H, Seifert H. Hopping transporters for lunar exploration [J]. Journal of Spacecraft and Rockets,1969,6(3):917-922

[2] Kovac M. Bioinspired jumping locomotion for miniature robotics [D]. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL),2010

[3] Wang Meng, Zang Xizhe, Fan Jizhuang, et al. Biological jumping mechanism analysis and modeling for frog robot[J]. Journal of Bionic Engineering,2008(5):181-188

[4] 胡胜海,杨奇,何蕾,等. 基于速度方向可操作度的机器蛙机构参数优化[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(3):351-356
Hu Shenghai, Yang Qi, He Lei, et al. Mechanism parameters optimization of bionic frog jumping robot based on velocity directional manipulability measure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2012,38(3):351-356(in Chinese)

[5] Birch M C, Quinn R D. Design of a cricket microrobot[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ:IEEE,2000:1109-1114

[6] 柴辉,葛文杰,魏敦文,等. 一种间歇式弹跳机器人的机构设计与跳跃性能分析[J]. 机械工程学报,2012,48(13):19-26
Chai Hui, Ge Wenjie, Wei Dunwen, et al. Mechanism design and hopping performance analysis of an intermittent hopping robot [J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(13):19-26 (in Chinese)

[7] Heitler W J. How grasshoppers jump[EB/OL]. StAndrews: The University of St Andrews,2007[2012-07-21]. http://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/jumping/

[8] Burrows M, Sutton P. Locusts use a composite of resilin and hard cuticle as an energy store for jumping and kicking[J]. The Journal of Experimental Biology,2012,215(19):3501-3512

[9] Chen Diansheng, Yin Junmao, Zhao Kai, et. al. Bionic mechanism and kinematics analysis of hopping robot inspired by locust jumping[J]. Journal of Bionic Engineering,2011,8(4):429-439

[10] 陈殿生,黄宇,王田苗. 轮式腿型机器人的越障分析与仿真[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(4):371-375
Chen Diansheng, Huang Yu, Wang Tianmiao. Obstacle climbing analysis and simulation of wheel-legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4):371-375 (in Chinese)

(编　辑:文丽芳)