

一种跳跃机器腿的设计

王 猛, 臧希喆, 赵 杰, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人技术及系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001, csleon3@163.com)

摘 要: 提出了一种跳跃腿机构. 为减轻质量, 降低能耗, 采用单电机驱动方式, 通过分时控制实现机构的跳跃、空中收腿和能量调节动作. 在结构设计中采用五杆机构作为腿部执行机构, 并增加了脚掌和跗跖关节以保证跳跃和着陆时的稳定性. 结合仿真分析了其跳跃过程及各阶段的关键动作, 最后对机器腿进行了跳跃实验, 实验证明: 其具有很好的跳跃能力及较高的跳跃效率, 能实现空中收腿动作以及稳定着陆.

关键词: 跳跃; 机器腿; 能量调节; 空中收腿; 五杆机构

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0069-05

Development of a robot with jumping legs

WANG Meng, ZANG Xi-zhe, ZHAO Jie, CAI He-gao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, csleon3@163.com)

Abstract: This paper presents a mechanical jumping leg with the capability of jumping, retracting the leg in the air and adjusting the energy of spring. For the purpose of reducing the weight and the energy consumption, the jumping leg is actuated by a single motor. The 5-bar linkage is adopted as the main part of the leg including the foot and the tarsometatarsal joint to enhance the stability during jumping and landing. The key motion of each phase in the whole jump is analyzed by simulation. Experiments are implemented on the jumping leg robot, and the result demonstrates that it has good capability of jumping, shows high jumping efficiency, and can retract the leg in the air for landing steadily. The mechanical leg will be applied to the design of jumping frog robot as hindlimb.

Key words: jump; mechanical leg; energy adjusting; leg retracting in the air; 5-bar linkage

国内外很多研究机构已经开始从事各种跳跃机器人^[1]的研究. 美国麻省理工学院的 Raibert 教授研制了可以在二维和三维空间里跳跃及奔跑的单足、双足和四足机器人^[2-3], 腿部采用伸缩式结构, 内有空气弹簧并由液压驱动. Hyon 教授研制了仿生机器狗, 其关节式机构腿用两个液压驱动作为肌肉, 用弹簧作为腱, 能够实现在平面上的跳跃^[4]. 上述两种机器人的缺点是体积和质量相对较大, 跳跃所需能耗较多, 并且能量转换效率偏低. 明尼苏达大学研制了易拉罐大小可以滚动和跳跃的机器人, 通过释放壳体上的弹簧片来跳

跃^[5]. 而美国 CWRU 大学 Birtch 等研制的机械蟋蟀长度只有 2 cm, 由人工肌肉驱动, 能够完成爬行和跳跃等多种动作^[6-8]. 它们的体型较小, 但由于跳跃方式的限制, 翻越障碍的能力有限.

针对大多数跳跃机器人存在的问题, 本文从减轻质量, 降低能耗, 提高跳跃效率和能力角度研制一种跳跃机器腿, 在分析腿部机构的推进力作用过程和跳跃效果的基础上进行关键机构设计. 最后通过实验验证了机械腿的跳跃能力和稳定着陆.

1 机器腿总体结构

为了使机构拥有卓越的跳跃性能^[9], 设计的机器腿结构如图 1、2 所示. 它由直流电机、跳跃腿驱动机构、跳跃腿执行机构和支撑板簧组成. 为了减轻质量, 降低能耗, 机器腿仅由一个电机驱动, 并通过跳跃腿驱动机构把它一个方向的转动通过绳索 1 用于腿的收放, 另一个方向的转动通

收稿日期: 2008-09-17.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z245); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0423).

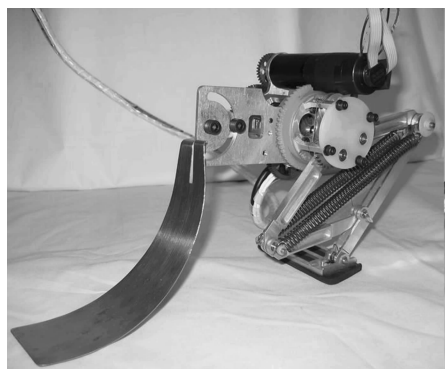
作者简介: 王 猛(1981—), 男, 博士研究生;

赵 杰(1968—), 男, 教授, 博士生导师;

蔡鹤皋(1934—), 男, 教授, 中国工程院院士.

过绳索2用于弹簧能量的储存和调节,通过分时控制实现跳跃、空中收腿和能量调节动作.支撑板簧用来维持机器腿的平衡,并可以通过螺栓调节

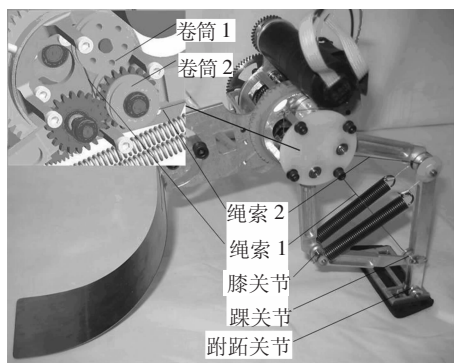
跳跃的角度.机构在压缩状态的总体尺寸为:长270 mm,宽95 mm,高136mm.质量为0.7 kg.



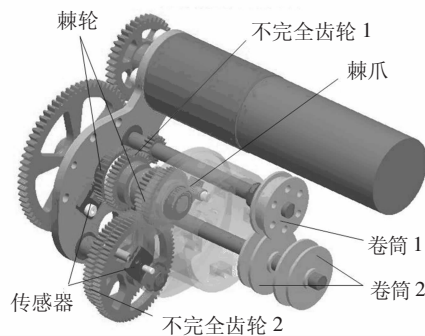
(a) 机器腿压缩状态左侧视图



(b) 机器腿压缩状态右侧视图



(c) 机器腿释放状态左侧视图



(d) 跳跃腿驱动机构模型图

图1 跳跃机器腿结构图

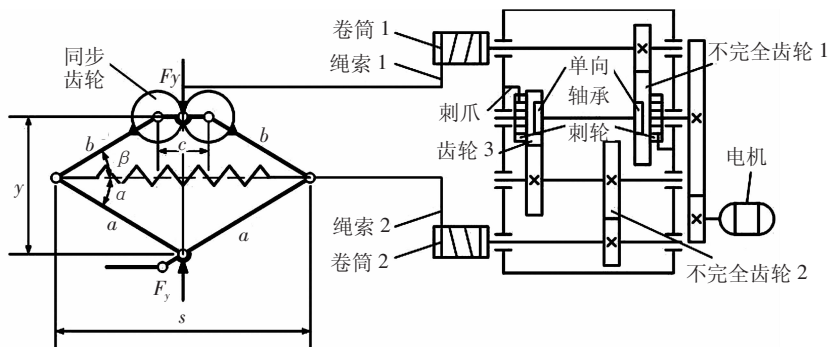


图2 跳跃机器腿结构示意图

1.1 跳跃腿执行机构

腿部机构的核心是五杆结构,另外增加了脚掌和跗跖关节以便调节起跳角度,还能够提高踝关节以防止腿碰到地面(图1、2).跗跖关节处有一被动扭簧,在起跳过程中能让脚掌充分与地面接触,利于弹簧能量充分转化到跳跃中,并防止打滑,提高跳跃的稳定性.五杆机构由于同步齿轮限制只有一个自由度,即沿 y 方向运动,通过拉动绳索1可实现腿回收,如图2所示.

实际上机构由线性弹簧产生了非线性的力.下面对五杆机构进行分析,其中, F_y 为五杆机构推进力, y 为运动方向位移, s 为弹簧长度, a , b , c 分别代表杆长度.

由图2可得出如下关系式:

$$\begin{cases} a \sin \alpha + b \sin \beta = y, \\ a \cos \alpha = b \cos \beta + c/2. \end{cases}$$

消去 β 得

$$2y \sin \alpha + c \cos \alpha = (y^2 + c^2/4 + a^2 - b^2)/a.$$

令

$$\lambda = (y^2 + c^2/4 + a^2 - b^2)/a,$$

$$\rho = (4y^2 + c^2)^{1/2}, \phi = \arcsin(c/\rho),$$

则

$$\alpha = \arcsin(\lambda/\rho) - \phi, \quad (1)$$

$$\beta = \arcsin[(y - a \sin \alpha)/b]. \quad (2)$$

杆件为二力杆,设杆 a 和杆 b 上的力分别为 F_a 和 F_b ,弹簧原长为 s_0 ,弹簧刚度为 k ,则得出下列关系式:

$$\begin{cases} F_a \cos \alpha + F_b \cos \beta = k(s - s_0), \\ 2F_a \sin \alpha = F_y, \\ 2F_b \sin \beta = F_y, \\ s = 2a \cos \alpha. \end{cases}$$

消去 F_a 和 F_b , 故

$$F_y = 2k(2a \cos \alpha - s_0) / \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right). \quad (3)$$

将方程(1)和(2)代入(3),可得出 F_y 关于 y 的关系式,其曲线如图3中实线所示,其中, $a = 80$ mm, $b = 70$ mm, $c = 20$ mm, $k = 1.4$ N/mm, $s_0 = 60$ mm. 由图3中实线可看出,作用力在跳跃中期最大,在起跳开始和结束时很小,这样可以有效地降低起跳初始对地面的过大冲击力导致机构提前离开地面的可能,有效地提高了跳跃效率^[9].

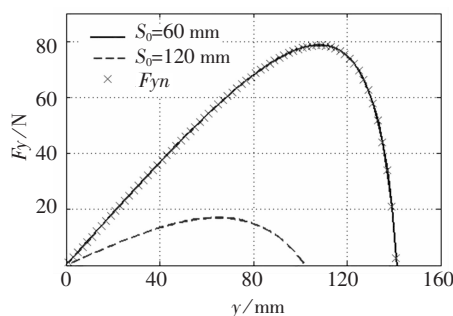


图3 五杆机构推进力与位移关系曲线

为进一步分析五杆机构跳跃性能,定义系统质心上升且动能增加的过程中地面支持力中五杆机构约束反力的那部分做功为

$$E = \int_{t_b}^{t_{off}} F_y \cdot v dt. \quad (4)$$

式中: t_b 为起跳开始时刻, t_{off} 为机构离开地面时刻, v 为质心速度. 为便于分析,用方程(5)对复杂方程(3)进行拟合

$$F_{yn} = ky(1 - l_0/(4l^2 - y^2)^{1/2}). \quad (5)$$

式中: $l = 75$ mm, $l_0 = 50$ mm. 由图3可看出 F_{yn} 能够代替 F_y 进行分析.

推进力 F_y 满足方程

$$m_1 \ddot{y} = F_y = F_{yn}. \quad (6)$$

通过方程(5)和(6),可得在 $k/m_1 = 1$, l_0 和 l 为单位长度, $\dot{y}(0) = 0$, $y(0) = 0.1$ 条件下,速度和作用力随时间变化的曲线(图4). 可见随着 y 和 t 的增大,作用力与速度均先增大后减小. 根据方程(4)可知,即使机构提前起跳,能量的损耗也大大降低.

在机构离开地面时,根据动量守恒定律可得到能量转化效率 η :

$$\begin{aligned} v_* &= m_1 v / (m_1 + m_2), \\ \eta &= \frac{(m_1 + m_2) v_*^2 / 2}{m_1 v^2 / 2} = m_1 / (m_1 + m_2). \end{aligned} \quad (7)$$

式中: m_1 为弹簧支撑的质量, m_2 为脚部质量, v_* 为机构离地时质心速度,由(7)可知为提高机构跳跃效率,应尽量降低足部质量与弹簧支撑质量的比值. 由于五杆机构脚部质量与机器腿总质量的比值非常小,质量分布合理,因此使机器腿具有较高的能量转化效率.

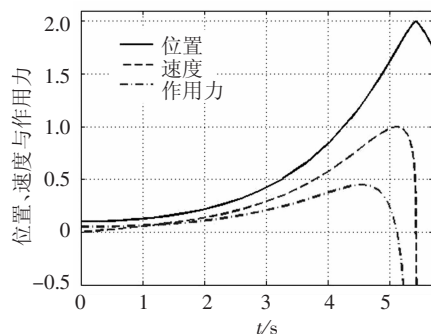


图4 五杆机构速度、作用力与时间关系曲线

1.2 跳跃腿驱动机构

跳跃腿执行机构的收放和弹簧能量的调节是由绳索1、2实现的,而对绳索1、2的控制是由电机和跳跃腿驱动机构完成的. 驱动机构主要包括单向轴承、棘轮、棘爪、齿轮和传感器,如图2所示,电机通过限定方向相反的单向轴承,分别带动不完全齿轮1与2的转动,从而控制卷筒1和卷筒2的滚动. 齿轮3与不完全齿轮1另一边为棘轮并分别与装在箱壁上的棘爪配合,通过单向轴承作用电机正反转分别只带动一个卷筒旋转. 传感器用于检测不完全齿轮位置(图1(d)),由于每个跳跃周期内不完全齿轮1和不完全齿轮2分别沿各自方向旋转一周,所以在它们上面分别装有磁铁,并与箱壁上的霍尔传感器配合来检测其初始零位. 齿轮转到无齿区前5个齿的位置被定为零位.

驱动机构的输入为电机旋转,输出为两个卷筒的滚动,通过电机对齿轮传动的分时控制实现跳跃腿的驱动. 卷筒1用于带动绳索1实现腿的收放,此时需要电机输出高转速. 卷筒2用于实现对弹簧伸长量的控制,它可释放与弹簧一端相连的,长度为60 mm的绳索2,通过转动不完全齿轮2到指定位置,可以控制卷筒2释放绳索2长度,从而调节弹簧储存的能量,并控制机器腿跳跃的高度和距离.

下面分析跳跃高度和距离与滚筒2圈数的关系. 释放绳索2相当于增加弹簧的等效初始长度,卷筒2的有效圈数目 $n = 2$, 弹簧等效初始长度 s_0 与卷筒2圈数目 n 的关系为

$$s_0 = 30n + 60.$$

弹簧能量

$$J = 0.5k(s - s_0)^2 = 0.5k(s - 30n - 60)^2. \quad (8)$$

当起跳角度为 60° 时,由能量守恒可知如下关系式:

$$\begin{cases} 0.5mv_1^2 + 0.5mv_2^2 = J, \\ v_1 = v_2 \tan 60^\circ. \end{cases}$$

式中: v_1 是起跳垂直速度, v_2 是起跳水平速度,可得出 v_1 和 v_2 :

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{3J/(2m)}, \\ v_2 = \sqrt{J/(2m)}. \end{cases} \quad (9)$$

由弹道轨迹原理知跳跃高度 H 和距离 L 满足

$$\begin{cases} H = v_1^2/(2g), \\ L = 2(v_1 v_2)/g. \end{cases} \quad (10)$$

将(8)和(9)代入(10)可得

$$\begin{cases} H = (3k/(8mg))(s - 30n - 60)^2, \\ L = (\sqrt{3}k/(2mg))(s - 30n - 60)^2. \end{cases}$$

跳跃高度 H 和距离 L 与卷筒2圈数 n 的关系如图5所示. 其中 $s = 157 \text{ mm}$, $k = 1.4 \text{ N/mm}$, $m = 0.7 \text{ kg}$. 当 $n = 0$ 时,机械腿可以达到最大的跳跃高度和距离.

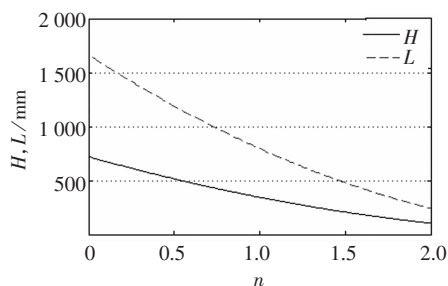


图5 跳跃高度和距离与卷筒2圈数关系

2 机器腿跳跃控制

机器腿的跳跃由单电机分时控制驱动机构实现,图6为它一个跳跃周期的控制流程,包括准备阶段和跳跃阶段.在准备阶段需要将不完全齿轮1和不完全齿轮2转到相应位置,以便调节弹簧储能和回收腿机构,从而准备释放机器腿.在跳跃阶段通过对电机正反方向驱动实现机器腿的起跳,空中收腿和着陆缓冲动作.在机器腿着陆后如果要重新下一个跳跃周期则进入准备阶段,否则跳跃过程结束.

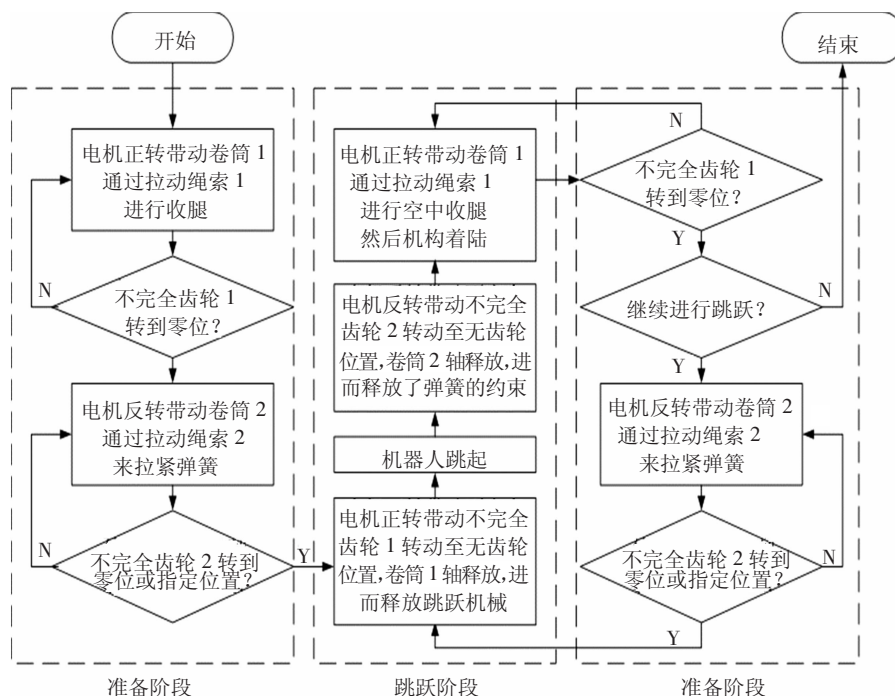


图6 机器腿跳跃控制流程

根据图6的控制流程,机器腿跳跃的仿真过程如图7所示.图7中(a)一(c)为起跳阶段,(c)一(e)为空中阶段,图(e)一(f)为着陆阶段.

在起跳阶段,为避免提前松开弹簧造成能量损失,要等到机器人充分起跳并且脚离开地面后,才释放绳索2对弹簧的约束,因此在电机释放卷筒1跳跃机构起跳后,电机对卷筒2的释放需要滞后一段时间,在adams仿真和跳跃实验中可测

得滞后大约为 0.07 s .

在空中阶段,当机器腿离开地面后,电机带动卷筒1即通过回收绳索1收腿,此时电机处于高转速状态,不能提供较大扭矩,所以通过释放卷筒2,放开对弹簧一端的约束,相当于弹簧初始长度 $s_0 = 120 \text{ mm}$,此时绳索1所需拉力如图3中虚线所示.这样电机可以通过绳索1在空中把腿收回来.

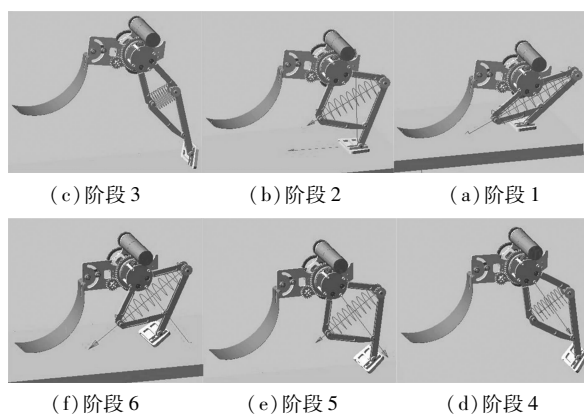


图7 机器腿跳跃过程仿真

在着陆阶段,为了缓冲机构,收腿时应使弹簧留有一定的拉伸余量,绳索1拉动五杆机构到 $y = 80 \text{ mm}$,如图3中虚线所示,此时 $F_y = 15 \text{ N}$,可以和前支撑板簧一起吸收着陆时地面冲击。

3 实验结果

考虑到后续要对后肢和前肢的多个电机进行控制,采用TMS320LF2407芯片提供PWM、刹车和方向信号,以LMD18200为驱动器来控制FAULHABER直流电机,并由电平转换芯片74LVTH245反馈电机码盘脉冲信号,零位信号通过霍尔传感器检测并经A/D转换后反馈到DSP电路板(见图8)。

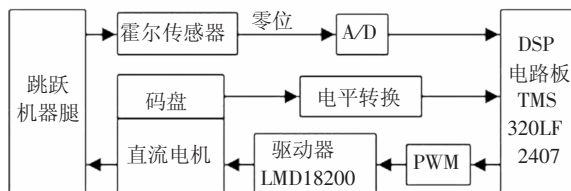


图8 控制系统结构图

通过此控制系统进行了跳跃性能实验。图9为机器腿的实际跳跃过程:(a)为机器腿跳跃的准备状态;(b)为机器腿刚要离开地面;(c)为机器腿滑行阶段,并正在收腿;(d)为机器腿将要着陆。它最好的一次跳跃能达到水平距离1 120 mm(机构长度的4倍),竖直高度500 mm(机构高度的3.5倍),能量的转化效率达到70%,具有跳过较大障碍物的能力。另外机器腿能实现空中收腿动作,这不但增加了它所能翻越物体的高度,而且能够在着陆阶段有效的支撑和缓冲机构,使得着陆更加稳定、可靠。



图9 机器腿跳跃过程

4 结 论

1) 机器腿整体结构紧凑、重量较轻,具有合理的质量分布,利于提高其能量转化效率。

2) 机器腿在一个电机驱动下能顺利完成跳跃,弹簧储能调节,空中收腿等动作,表现了令人满意的跳跃能力,并具有很高的功率密度。

3) 腿部五杆机构与脚掌配合,可以降低提前离开地面的可能,从而降低了能量损耗。

4) 鉴于机器腿的这些优点,将它作为后肢应用到后续的青蛙跳跃机器人研究上。并且由于机械腿的模块化特点,还可推广应用到其他跳跃机器人系统中。

参考文献:

- [1] 刘壮志, 席文明, 朱剑英, 等. 弹跳式机器人研究[J]. 机器人, 2003, 25(6): 568-573.
- [2] RAIBERT M H. Legged robots that balanced [M]. Cambrige, USA: MIT Press, 1986.
- [3] RAIBERT M H, BROWN H B, CHEPPONIS M. Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine [J]. International Journal of Robotics Research, 1984, 3(2): 75-92.
- [4] HYON S H, MITA T. Development of a biologically inspired hopping robot - kenken [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, USA: [s. n.], 2002: 3984-3991.
- [5] STOETER S A, PAPANIKOLOPOULOS N. Autonomous stair-climbing with miniature jumping robot [J]. IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 2005, 35(2): 313-324.
- [6] BIRTH M C, QUINN R D, HAHM G, et al. Design of a cricket microrobot [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: [s. n.], 2000: 1109-1114.
- [7] LAKSANACHAROEN S, POLLACK A, NELSON G M, et al. Biomechanics and simulation of cricket for microrobot design [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: [s. n.], 2000: 1088-1094.
- [8] BURDICK J, FIORINI P. Minimalist jumping robots for celestial exploration [J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(7-8): 653-674.
- [9] HALE E, SCHARA N, BURDICK J, et al. A minimally actuated hopping rover for exploration of celestial bodies [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: [s. n.], 2000: 420-427.

(编辑 杨 波)