

形状记忆合金驱动的蛇形机器人运动仿真研究^①

Motion Simulation of Snake-Like Robot with Shape Memory Alloy

赵丽娟 姜天阳 (辽宁工程技术大学 机械学院 辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于 Serpenoid 曲线建立了蛇形机器人行波运动和攀爬运动的运动学、动力学模型, 根据模型提出一种具有万向节功能的 pitch-roll 模块, 利用形状记忆合金驱动器具有结构小和只受温度变化影响两大特点建立了蛇形机器人关节。应用 MSC/ADAMS 虚拟样机软件对基于形状记忆合金驱动蛇形机器人进行行波运动和攀爬运动的动力学分析, 并对仿真过程中遇到问题提供了解决办法。模型仿真效果非常理想, 完全达到设计要求, 为下一步研制物理样机提供了理论指导, 也为其他仿生机器人的研究提供了参考。

关键词: 形状记忆合金 蛇形机器人 行波运动 攀爬运动 MSC/ADAMS

1 引言

蛇形机器人的行波运动与蜿蜒运动是两种复杂的空间运动形式, 其运动关节需要 2 个以上的自由度, 通常采用特制关节如万向节式、连杆式等形式, 结构复杂、控制困难。本文根据形状记忆合金的随温度变化而产生伸缩变化的特性驱动机器人, 模拟机器人两种复杂运动。形状记忆驱动器具有重量轻、结构简单、通用性强、不受温度以外的环境或气氛影响的特点。非常适合在复杂、恶劣环境中运用^[1]。

2 蛇形机器人机构与控制

2.1 机构设计

形状记忆驱动器两大特点: 第一个特点是可以实现结构小型化。这一点从动作机构简单、元件为单一合金构成等特性来看, 是理所当然的。驱动器外层多用硅橡胶包裹, 硅橡胶起偏动弹簧作用, 但是, 因元件的驱动源为热能, 当元件的尺寸变大时, 动作速度反而变慢。第二点, 是只受温度影响, 因此在水中或者真空等条件恶劣的地方也可以安装, 不需要密封。利用这个特点, 形状记忆驱动器在电子显微镜内样品移动装置上、化学设备的反应装置内以及原子反应堆中的驱动装置上有很大前途^[2]。

根据形状记忆驱动器以上两大特性本研究提出基于 Pitch-Roll 模块的蛇形机器人在运动时由于 R 关节的存在, P 关节能够较为灵活地选择在支撑物体附着角度和关节驱动装置作用力的方向, 这些特性使得机器人在形状不规则的物体上运动时尤为重要, 故其在运动功能上大大提高机器人对运动对象形状的适应性和作用力的有效性。因此, 基于 P-R 模块的蛇形机器人无需具备特别强大的动力系统即可在运动对象的表面做行波运动和缠绕附着在运动对象外壁。蛇形机器人执行单元采用管套式结构设计, P 关节在行波运动时有 $\pm 15^\circ$ 的范围、攀爬运动时具有 $\pm 90^\circ$ 的活动范围, 单节重量设定为 0.08kg, 每节长度 40mm, 该模型具有体积小、重量轻结构简单、通用性比较强的特点。如图 1(a)所示, 在关节连接处上下各加 2 个 SMAA(形状记忆合金驱动器)。在各关节之间也有一个记忆合金弹簧, 使得机器人在行波运动和攀爬时, 给系统以足够的前进动力并实现关节在攀爬时候的外伸, 与自然界中的蛇更为贴切、真实, 如图 1(b)所示^[3]。

2.2 机器人空间运动数学模型建立^[4]

为了得到机器人各关节的转角变化与其在惯性坐标下位置几何关系, 蛇形机器人简化连杆模型的坐标设置, 如图 2 所示。假设每一连杆质量均布蛇体在垂

^① 基金项目: 辽宁工程技术大学博士基金项目(07-70DZ56A); “一种蛇形机器人”已获国家发明专利, 专利号: ZL02109369.5
收稿时间: 2008-10-28



图 1 P-R 模块连接、关节处记忆合金弹簧

直于支撑面的平面内运动，对于 N 个关节的蛇形机器人就机械系统具有 $N+2$ 自由度，其中， $N-1$ 自由度用来描述蛇体形状， 2 自由度用来描述蛇体在惯性坐标下的位置， 1 自由度用来描述惯性坐标下的方向。

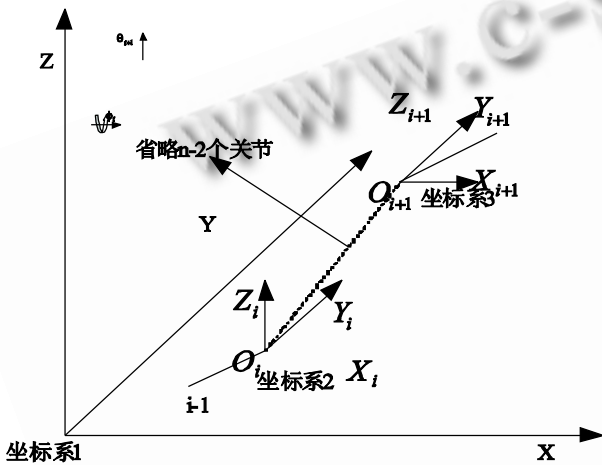


图 2 蛇形机器人空间运动学模型

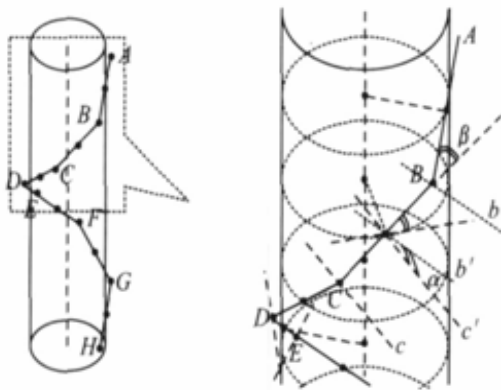


图 3 简化的空间连杆模型

为了建立一个可实际应用于蛇形机器人运动通用且易于控制的步态,蛇形机器人的行波运动方程选取为 Serpenoid 曲线,它是一种可用于实际蛇形机器人控制的蠕动步态,该蠕动步态的适用于由不同连杆数

组成的波形,其运动曲线曲率方程为

$$\rho(s) = \frac{2K_n\pi\alpha}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s\right) \quad (1)$$

式中: L -蛇体长度; K_n -蛇体内传播波的个数; α -运动曲线初始弯角; s -机器人沿蛇形曲线轴线方向的位移

本文中我们通过 N 条线段近似模拟 Serpenoid 曲线,本文采用个单个长度为的连杆,如图 2 所示。假设连杆的各关节点落在曲线上,则相邻连杆之间的相对转角为表征运动形状关节控制变量。

$$\begin{aligned} \theta_i(s) &= \int_{s+(i-1)l}^{s+il} \rho(u) du \\ &= -2\alpha_{\theta_0} \sin\left(\frac{K_n\pi}{n_\theta}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n_\theta}i\right) + K_l l \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_i(s) &= \int_{s+(i-1)l}^{s+il} \rho(u) du \\ &= -2\alpha_{\phi_0} \sin\left(\frac{K_n\pi}{n_\phi}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n_\phi}i + \delta\varphi\right) + K_l l \end{aligned}$$

其中, θ_0 和 ϕ_0 -两个波运动的初始弯角; n_θ 和 n_ϕ -每一运动平面内模块个数; $\delta\varphi$ -两个波的相位差; L -机体长; l -每一模块的长度; K_n -体内传播波的个数; i -任意一个关节运动的初始弯角; s -蛇型机器人尾部沿蛇形曲线轴线方向的虚位移, K_l -曲率偏差。如果改变 K_l 的大小,就可以改变运动方向,改变 s 大小和正负号,则可以改变运动的速度和波的传播方向。

图 3 表明,可以通过 R 关节轴线共线且 P 关节轴线平行作为关节转动零位移处使得在各旋转关节转过 α 和 β 角度后缠绕在树干上。图中所标 A 、 B 、 \dots 、 H 点处为 P 关节, AB 、 BC 、 \dots 、 GH 的中点处为 R 关节。连杆系统与树干相切,切点为各 R 关节所在处,并皆位于倾角为 θ 的等距螺旋上。 P 关节所在 A 、 B 、 C 等各点皆不与树干接触,处于悬空状态。经分析得,各关节转角与螺旋轨迹倾角函数关系为:

$$\begin{cases} \theta_i(s) = \arccos\left(1 - \frac{2l^2 \sin^2 2\theta}{4r^2 + l^2 \sin^2 2\theta}\right) \\ \phi_i(s) = \arccos\left(1 - \frac{2l^2 \cos^2 2\theta}{r^2 + l^2 \sin^2 2\theta}\right) \end{cases} \quad (3)$$

通过公式(2),输入已知值如 $K_n = 2$ 、 $\alpha = \frac{\pi}{4}$ 、 $L = 1200mm$ 、 $l = 40mm$ 可以计算运动所需角度。得到进行尺蠖运动时,所需 $\theta_i(s) = \frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{30}\right) \sin\left(\frac{4\pi}{1200}s + \frac{4\pi}{30}i\right) \approx 15^\circ$,

通过推导, SMAA 就要使机器人在初始时刻保持 15° 初始弯角, 以便模型顺利与爬杆接触。同理, 在做攀爬运动时各 R、P 关节根据式(3)所得 $\phi_i(s) \approx 90^\circ$ 。

3 蛇形机器人行波运动^[5-8]

本文机器人动力依靠形状记忆合金驱动器提供, 驱动器使用 NI-TI 合金丝, 在 ADAMS 中采用多弹簧阻尼器模拟其紧缩与延伸, 机构如图 4 所示。在 ADAMS 软件中每个关约束由一个 SMAA 弹簧、一个点线副和平行副组成: 点线副约束第一个构建中心点 Z 轴方向转动; 平行副约束关节 1 与关节 2 之间的连接转动, 保证 R 的顺利进行。在各个关节连接处, 统一在模型右侧使用旋转副连接。添加约束时应尽力避免在对称模型两边添加 2 个旋转副约束两个构件, 因为旋转副是刚性约束可能会导致系统冗余约束使仿真运算矩阵奇异^[9]。

通过大型 CAD 软件建模, 将三维模型导入运动动力学仿真软件 ADAMS 中, 添加约束副、驱动力、转矩、记忆合金材质等信息。导入后的具体效果及坐标系如图 5 所示。

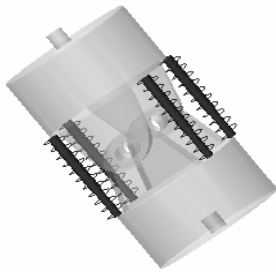


图 4 单个关节在 ADAMS 中效果图

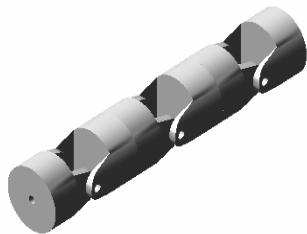


图 5 蛇形机器人机构图

蛇形机器人的行波运动是依靠波在体内传播而产生的, 机体的部分关节与支撑面接触, 它们与支撑面之间作用力的大小和方向随蛇形机器人运动形态的变

化而改变, 各个接触关节在每一刻所受到的摩擦力大小和方向不同, 其合力为驱动力, 可适应复杂多变的作业环境, 诸如穿越狭小的管道、跨越沟壑、爬坡、翻越障碍等。行波运动采用类似与尺蠖的蠕动形式, 利用伸缩元件的变形, 并与保持机构相结合, 实现微小位移。为了使模型更具有说服力与生动性, 设计蛇形机器人由 16 个关节组成, 具体运动过程如图 6 所示。



图 6 蛇形机器人行波运动流程图

图 7 是靠近机器人中心 MARKER 点的 Z 方向位移曲线图, 在 2s 钟前的时刻, 头部出于行波初始运动状态, 此刻 Z 向位移只有 1mm 左右, 这是因为机器人运动中, 关节与地面接触的数量多, 各关节与地面的摩擦力略微小于前段进行行波运动关节与地面产生的摩擦力, 而这个摩擦力就是机器人所需要的动力。随着仿真的继续, 从 2s 到 5s 机器人在 Z 轴方向上前进了 12.5mm, 这 3s 内, 波形完全展开, 机器人各关节与地面的摩擦力达到最小值, 各关节所提供的动力增大, 机器人向前移动的速度增大, 位移值提升迅速。5 秒以后, 机器人行波运动即将结束, 关节与地面接触的数量增多, 摩擦力增大, 随着末尾关节的运动, 机器人在 Z 向的位移只有 0.1mm, 整个仿真结束。

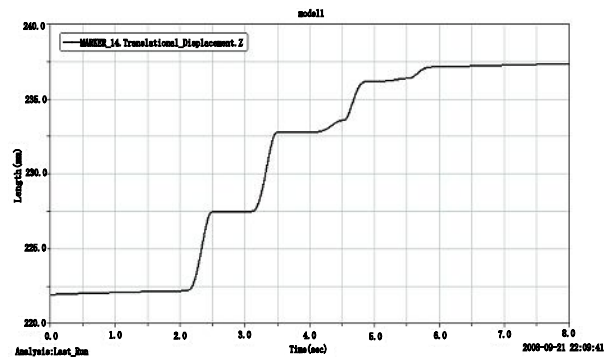


图 7 机器人 Z 方向位移曲线图

图 8 显示，机器人在仿真时，X 向的位移变化曲线。可以看到，机器人仿真时，在前段关节弯转与地面产生摩擦时刻，机器人整体产生晃动，最大位移差 1.85mm。从 1.4s 后，机器人运动相对稳定，只在中线位置来回摆动。6s 后仿真进入尾声，曲线在 55.3mm 处小幅波动，可近似看做静止在地面上。从图 8 可看出，虽然本设计机器人在进行行波运动时有抖动，但模型整体未发生翻转，运行情况稳定。模型仿真前后在 X 向有 0.7mm 偏移，但相对于整体尺寸可忽略不计，符合设计要求。

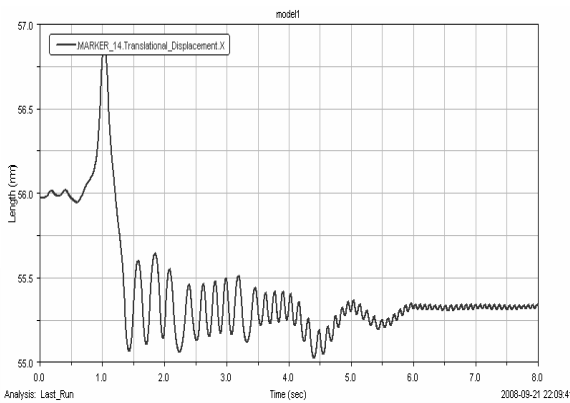


图 8 机器人 X 方向位移曲线图

行波运动完全展开时，机器人的重心位置是影响机器人运动稳定性和进给速度的主要因素。图 9 选择机器人靠近重心相邻的三个关节的旋转副力矩，以证明越靠近重心位置对机器人的稳定性和进给速度影响越大。从图中发现节点 8 的曲线所需力矩最大，而节点 8 离机器人的重心距离最近，节点 8 的力矩为机器人的最大输入力矩。在该环境参数下节点 4、节点 12 是对称关节，它们关节力矩变化相同，相差不多，更加证明了靠近机器人重心的节点是影响机器人运动的关键因素，只要改变重心附近的节点就可以影响机器人的行波运动以及翻滚运动，是运动的核心。

图 10 是关节 9 中心进给弹簧的受力情况说明弹簧的可靠性，它可圆满的保证了关节处的连接。弹簧在 0~2s 和 6~8s 处受力变化小，波形相对较缓和。2s 到 6s 之间，由于行波运动渐渐出于完整形态，弹簧受力波动较大，在经过当前弹簧时，受力的波动达到两次顶峰值。但总体看来，弹簧受力波动大致在之内，保持系统的平稳可靠。

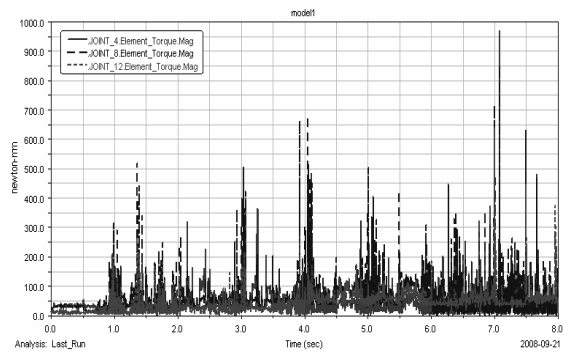


图 9 节点 4、8、12 力矩曲线图

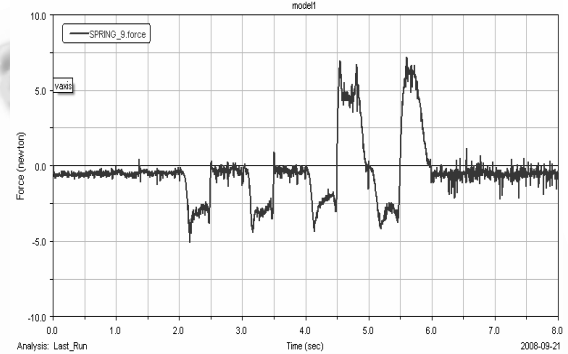


图 10 中心进给弹簧受力曲线图

4 蛇形机器人攀爬运动[1,5-7]

图 11 为机器人在攀爬中具体过程组图。从图可以看出，机器人圆满完成了从蛇头的切入、弯转、攀爬三个重要步骤，运动过程平稳，体现形状记忆驱动蛇形机器人的设计的可靠性。

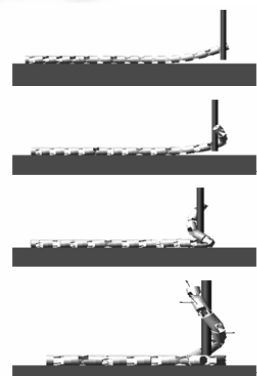


图 11 蛇形机器人攀爬步骤图

图 12(a)是机器人缠绕在半径为 20mm 的圆柱体上重心位移相对轨迹，运动过程中要求机器人保证自身重力和各关节与爬杆之间摩擦力作用于同一竖直方

向。从曲线看出，由于模型与杆之间接触力和所定义库伦摩擦力的关系，导致位移轨迹出现抖动。但从曲线图(a)和实际轨迹图(b)中可以看出曲线完整，质心轨迹围绕爬杆呈螺旋状，机器人运动基本平滑^[10]。

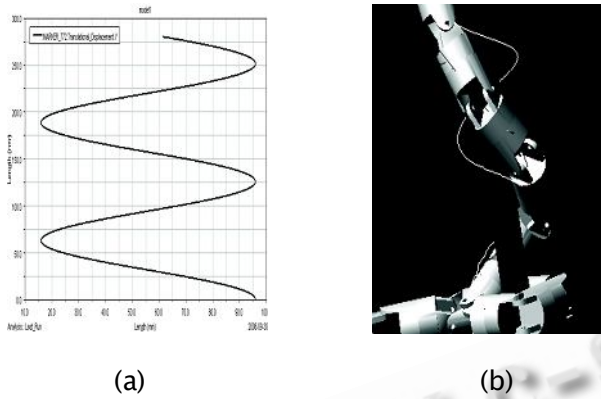


图 12 机器人质心轨迹图

仿真过程中，各个关节之间的转角变化是攀爬问题的关键，图 13 所示相邻两个关节转角变化图。从图中发现：0~50s 之间相邻两关节都朝各自的方向旋转，角度变化在 20 度之内。这是关节接触杆时，前段的关节随着蛇身进行了旋转而后段的关节正在随蛇身的攀爬而做进给运动。当两关节攀爬到杆上曲线 2 经历了 50S 的缓冲过程，而曲线 1 只有 25S 的缓冲时间。因为图中曲线 1 是先于曲线 2 进行攀爬运动，接触的关节少，与杆的摩擦力小。曲线 3 是曲线 2 下一时刻相邻关节的转角变化，从曲线 2 跟曲线 3 的比较中我们看出，后续关节与杆摩擦力越大，第二阶段的攀爬时间过渡就越长，这与曲线 1 跟曲线 2 的二者比较结果呈现出同样的趋势。第三阶段关节的角度出现了一个显著的变化，两个关节之间首次攀爬中开始对杆进行缠绕动作使得角度改变，而随着攀爬的关节增多，自身的重力增大，摩擦力不能承受自身重力开始慢慢下滑，导致角度的变化越来越大、越来越快，这点我们可以从图中三条曲线的斜率得到说明。当关节下滑到一定位置后，摩擦力与重力持平，模型稳定运行，仿真运行完毕。

5 结论

本文介绍了利用形状记忆驱动器两大特性，通过对驱动器的控制，完成蛇形机器人的行波运动和攀爬运动设计，模拟了蛇形机器人的两种运动，所得到的仿真结果符合设计要求，证明本文所设计的蛇形机器人是合理的、可行的。

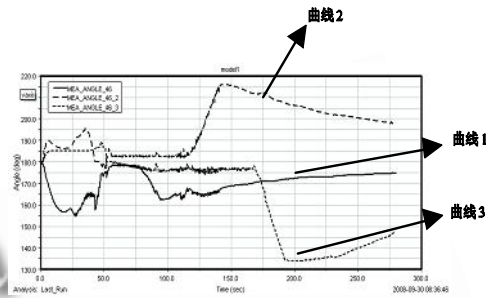


图 13 相邻的两个关节转角变化图

参考文献

- 1 孙洪,刘立祥,马培荪.攀爬蛇形机器人爬树的静态机理研究.机器人,2008,30(2):112-116,122.
- 2 舟久保熙康,千东范.形状记忆合金.北京:机械工业出版社,1992:18-104.
- 3 朱春霞,朱立达,刘永贤,蔡光起.基于 ADAMS 的并联机器人振动特性仿真及结构优化.系统仿真学报,2008,20(14):3721-3725.
- 4 陈丽,王越超,马书根,李斌.蛇形机器人侧向运动的研究.机器人,2003,25(3):246-249.
- 5 李军,邢俊文.ADAMS 实例教程.北京:北京理工大学出版社,2002:19-52.
- 6 李军,陶永忠.MSC.ADAMS FSP 基础培训教程.北京:清华大学出版社,2004:173-180.
- 7 李军,陶永忠.MSC.ADAMS/VIEW 高级培训教程.北京:清华大学出版社,2004:60-61.
- 8 侯赤,万小鹏,赵美英.基于 ADAMS 的小车式起落架仿真分析技术研究.系统仿真学报,2007,19(4):909-913.
- 9 陈丽,王越超,马书根,李斌.蛇形机器人行波运动的研究.机械工程学报,2004,40(12):38-43.
- 10 叶长龙,马书根,李斌,王越超.蛇形机器人的转弯和侧移运动研究.机械工程学报,2004,40(10):119-123,128.