

# 蛇形机器人的转弯和侧移运动研究\*

叶长龙

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016)

马书根

(日本国立茨城大学工学部 茨城 316-8511 日本)

李斌 王越超

(中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016)

**摘要:** 介绍了沈阳自动化研究所研制的蛇形机器人机械结构和控制结构。在分析蛇形曲线的基础上, 提出幅值调整法、相位调整法和侧移调整法三种新方法, 来处理蛇形机器人侧向滑动带来的方位偏转和完成蛇形机器人自主转弯控制, 并给出几种方法的量化关系, 建立动力学仿真模型进行了运动仿真。幅值调整法虽然使蛇形机器人转弯角度受到限制但却保证了运动的连续性和稳定性。相位调整法能够使蛇形机器人准确地完成转弯运动。侧移调整法能够实现蛇形机器人前进过程中的侧向位置调整, 同时保证运动方向的准确性。将上述方法应用到蛇形机器人的控制中, 用仿真和试验验证了以上方法的有效性。

**关键词:** 蛇形机器人 蛇形曲线 幅值调整法 相位调整法 侧移

**中图分类号:** TP24

## 0 前言

蛇形机器人的研究开创了一个新的仿生机器人研究领域。自20世纪70年代日本的第一条蛇形机器人问世, 各国的许多研究人员开始了该类机器人的研究, 提出大量的相关理论<sup>[1~9]</sup>, 制作了多台样机。近几年, 我国科技工作者也开始研究蛇形机器人<sup>[10]</sup>。

蛇是一种无肢动物, 依靠细长身体的蜿蜒运动推动自身高速运动。根据蛇的运动原理制作的蛇形机器人, 可以克服轮式机器人和腿式机器人的缺点, 能够在多种环境中运动。例如: 在草地中爬行, 在水中游泳, 在凹凸不平的地面运动, 在沼泽中前进; 作为操作臂完成各种危险作业, 进入狭小空间完成修补和抢救工作。而且蛇形机器人机构简单, 模块化设计能够实现可重构。另外, 蛇形机器人的节律运动为其控制提供了有利条件。沈阳自动化所已制作出两代蛇形机器人功能样机, 在设计和试验中积累了很多宝贵经验。

首先介绍蛇形机器人结构, 包括机械结构和控制结构。然后, 说明蛇形曲线, 并在此基础上, 提出有关蛇形机器人转弯的幅值调整法和相位调整法, 同时提出了侧移运动的相关规划。对提出的几种运动方法作了量化分析。最后, 用仿真和试验的

方法验证了此规划。

## 1 蛇形机器人结构

沈阳自动化所的蛇形机器人在机构上采用模块化设计(如图1所示), 每个模块具有1自由度, 多个模块按一定方式连接可以组装成三维蛇形机器人(如图2所示)。在控制上, 选用CAN总线的控制方式实现一对多点的控制, 满足实时控制的需要(如图3所示)。每个模块都装有一片嵌入式16位单片机, 各个单片机独立处理关节的运动信息和传感信息, 为机器人的分布式控制提供有利条件。蛇形机器人头部安装有GPS定位系统、无线通信系统和摄像头, 向主控计算机提供位置信息、通信和图像信息。蛇形机器人尾部安装有电池, 为蛇形机器人运动提供能源, 该能源可供机器人至少运动40 min。目前, 所有模块实现了集成。

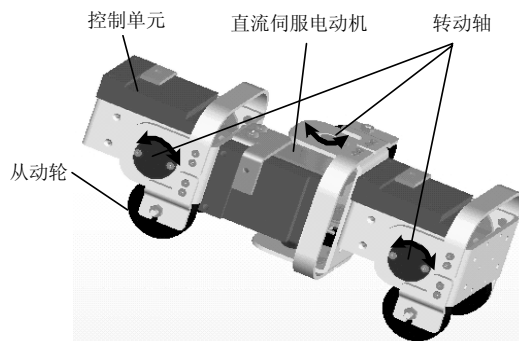


图1 蛇形机器人机构

\* 国家863高技术资助项目(2001AA4223600)。20030901收到初稿, 20040420收到修改稿



图 2 蛇形机器人

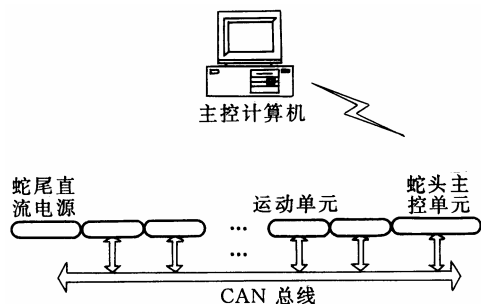


图 3 蛇形机器人控制系统总体结构

## 2 蛇形机器人运动曲线

自然界中蛇的运动形式可大致分为四种<sup>[4]</sup>: ①蜿蜒运动: 是最常见也是运动效率最高的运动形式。蜿蜒运动时, 蛇依靠与地面的切向摩擦力和法向摩擦力的差推动自身运动, 需要身体的肌肉产生较大力矩和保持收缩与伸展的连续性。②直线运动: 类似于蚯蚓的收缩运动方式, 是蛇在捕食过程中采用的运动方式。③收缩运动: 是蛇在比较光滑平面或狭小空间下采用的一种运动方式<sup>[9]</sup>。④侧向运动: 更确切地说应该叫做斜侧运动, 是沙漠中响尾蛇的一种运动方式, 在向前运动的同时产生侧向运动。就蜿蜒运动而言, 日本的 S. Hirose<sup>[4]</sup>教授最早提出了蛇形曲线(如图 4 所示), 该曲线是在对生物蛇进行大量的运动观测后提出的。通过在蛇形机器人上的试验, 证明采用蛇形曲线的机器人运动效率高、波形连续<sup>[3,5]</sup>。马书根教授<sup>[2]</sup>从肌肉的力学分析角度证明了此种曲线, 并从动力学角度分析了采用蛇形曲线的蛇形机器人的运动<sup>[1]</sup>。

蛇形曲线(如图 4 所示)的曲率方程为

$$\rho = -ab \sin(bs) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  ——幅值角(rad)

$b$  ——比例常数(rad/m)

$s$  ——蛇形曲线长度(m)

式(1)对  $s$  积分得沿曲线角度的表达式

$$\theta(s) = \alpha \cos(bs) \quad (2)$$

据式(2), 蛇形机器人关节相对转角为

$$\varphi = \theta(s+l) - \theta(s-l) = -2\alpha \sin(bl) \sin(bs) \quad (3)$$

式中  $2l$  ——蛇形机器人的单元长度

将上式改写成各个关节角关于时间的函数得

$$\varphi_i(t) = A \sin[(\omega t + (i-1)\beta)] \quad (4)$$

式中  $A = -2\alpha \sin(bl)$

$$\omega t = bs$$

$$\beta = 2bl$$

$i$  ——第  $i$  个关节

$$i = 1, \dots, n$$

$t$  ——时间

$n$  ——为机器人运动关节的数量

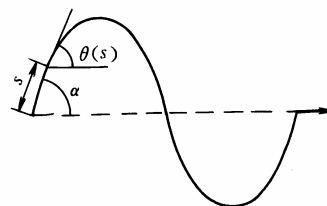


图 4 蛇形曲线

为获得更多有利的环境信息和保证自己的前进方向, 在运动过程中, 蛇头是始终指向运动波形前进方向(如图 4 所示)。根据每个关节的周期变化, 可以推导出蛇头关节运动的函数为

$$\varphi_h = -\theta(s) = -\alpha \cos(bs) \quad (5)$$

写成时间的函数为

$$\begin{aligned} \varphi_h(t) = & -\alpha \cos(\omega t + (n-1)\beta + bl) = \\ & -\alpha \cos(\omega t + (n-0.5)\beta) \end{aligned} \quad (6)$$

该函数使蛇形机器人头部的方向始终与波形轴线方向平行。也就是说, 蛇形机器人头上的摄像头获得的总是前进方向的信息, 从而大大降低了由于周期运动引起的图像晃动现象。这样就使后台操作者能够很容易根据图像信息判断机器人方位, 随时调整由于各种原因引起的机器人方位偏离。

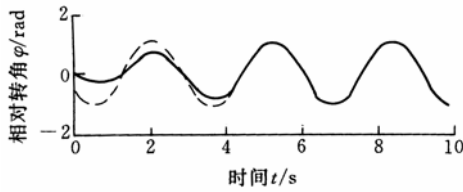
通常, 蛇形机器人的起始状态构形是一条直线。当机器人开始运动时, 首先对各个关节角度进行插值, 使其到达蛇形曲线的起始位置, 然后按蛇形曲线开始运动。试验证明这种规划方法在插值阶段并没有保证蛇形机器人前进, 只是在原地滑动, 甚至产生方向偏离。所以, 有必要对这一运动规划加以改进。为此, 提出关节运动输入函数为

$$\varphi_i(t) = A(1 - \exp(-\lambda t)) \sin(\omega t + (i-1)\beta) \quad (7)$$

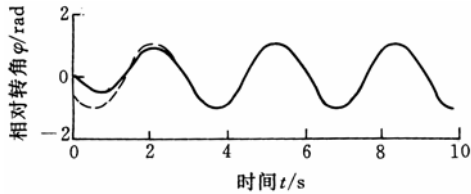
式中  $1 - \exp(-\lambda t)$  ——对波形从直线到蛇形曲线规划的表达式

该函数避免了插值规划, 而且可以使蛇形机器人始终满足蛇形曲线的形状。从而减少了规划时间、限制了插值带来的方向偏离, 使得蛇形机器人的运动更加有效。其中  $\lambda$  是机器人从直线运动到给定蛇

形曲线的快慢比例因子，λ 越大表示运动到给定蛇形曲线的速度越快(如图 5 所示)。



(a)参数为α=-π/3, ω=1, β=π/6, λ=0.5的相对转角变化



(b)参数为α=-π/3, ω=1, β=π/6, λ=1的相对转角变化

图 5 起始运动规划(虚线表示原输入, 实线表示改进的输入)

### 3 转弯方法的提出

许多学者对蛇形机器人运动曲线作了大量研究<sup>[4,7]</sup>,但涉及到如何使蛇形机器人转弯及控制转弯半径的研究尚少。蛇形机器人在运动过程中,由于滑动的原因必然产生偏离原路径的运动,或者由于运动的需要而执行某种偏转运动。因此,提出调整蛇形机器人运动方位的方法是非常必要的。一般可将偏离运动分为三种:方向偏离,侧移和两者的结合。在分析蛇形曲线的基础上,提出幅值调整法和相位调整法两种新的转弯方法,并在下一部分提出一种简单的侧移方法。通过这些方法可以实现蛇形机器人的方位调整。

#### 3.1 中心调整法(Hirose)

该方法的数学表达式为

$$\phi_i(t) = A \sin(\omega t + (i-1)\beta) + \gamma \quad (8)$$

式中 γ——中心调整因子

该输入函数是将蛇形曲线的曲率方程改写为如下形式

$$\rho = -ab \sin(bs) + c \quad (9)$$

式中 c——比例常数(rad/m),用来改变蛇形曲线的形状,从而实现转弯运动

这种方法使输入角度的对称中心线偏离零位置 γ 值,从而改变前进方向。根据式(8)和式(9)并结合式(2)~(4)的推导过程,可以得到

$$\gamma = 2cl$$

根据曲率公式(1)和(9)可以得出蛇偏转角度的计算式

$$\phi = cs = \frac{\gamma}{2l}s = \frac{\gamma}{2lb}\omega T \quad (10)$$

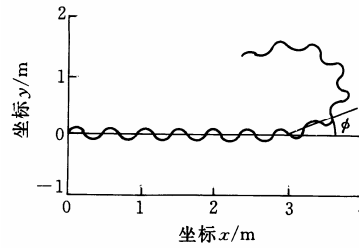
式中 T——转弯时间

转弯半径

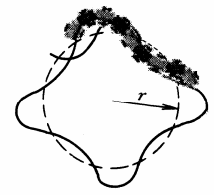
$$r = \frac{1}{c} = \frac{2l}{\gamma} \quad (11)$$

φ, r 的大小与转弯的起始位置有关。

该方法的缺点是不仅在正常运动转入转弯运动时的角度值不连续,而且没有充分保证蛇形曲线的波形(如图 6 所示),运动效率低,转弯角度不准确。



(a)前进中转弯



(b)仿真蛇的圆周运动

图 6 采用中心调整法的蛇形机器人的运动

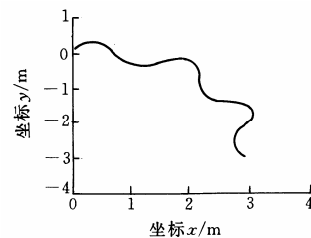
#### 3.2 幅值调整法

该方法的数学表达式为

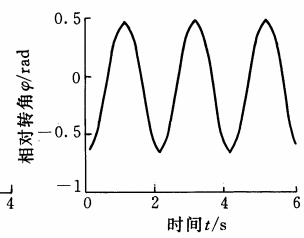
$$\phi_i(t) = A[1 + \Delta A \text{sgn}(\sin(\omega t + (i-1)\beta))] \times \sin(\omega t + (i-1)\beta) \quad (12)$$

式中 ΔA——幅值调整因子

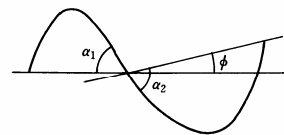
该方法通过将幅值与相位变化联系起来实现不同相位的不同幅值。式(12)表示当角度值正负变化时,蛇形曲线的幅值发生变化,实现转弯运动(如图 7a、b 所示)。其缺点为转弯角度受到幅值范围的限制,转弯半径大(如图 7d 所示)。优点是在执行转弯动作时,输入角度连续;比较图 7d 和图 6b,可以看出幅值调整法的运动轨迹始终为蛇形曲线;转弯准确。



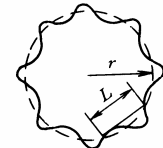
(a)蛇形机器人运动轨迹



(b)关节角度变化



(c)转弯角度计算图



(d)仿真蛇的圆周运动

图 7 采用幅值调整法的蛇形机器人的运动

利用该方法在一个运动周期中只能实现两次转弯动作。转弯前后分别是不同幅值角的蛇形曲线,

而且两个蛇形曲线的结合点是连续的。所以转弯角度的定量关系为(如图 7c 所示)

$$\phi = \alpha_2 - \alpha_1 = 2\alpha\Delta A \quad (13)$$

式中  $\alpha_1 = \alpha(1 - \Delta A)$

$$\alpha_2 = \alpha(1 + \Delta A)$$

其转弯半径

$$r = \frac{L}{2\phi} = \frac{L}{4\alpha\Delta A} \quad (14)$$

式中  $L$  ——一个周期内蛇头运动的直线距离

### 3.3 相位调整法

该方法的数学表达式为

$$\varphi_i(t) = A\sin(\omega t + (i-1)\beta + \sigma) \quad (15)$$

式中  $\sigma$  ——相位调整因子

在大量观察蛇转弯运动的基础上, 提出相位调整法的转弯方法, 其输入角度函数为式(15)。该方法使蛇形机器人无论在直线运动过程中, 还是在转弯过程中都保持蛇形曲线的波形, 而且能够一次性准确执行转弯角度。该方法的基本思想是: 蛇形机器人直线运动时  $\sigma = 0$ , 在机器人转弯时, 当头部运动到其波形曲线的切线与转弯方向相同时, 改变此时的相位角使得机器人的前进方向指向转弯方向。

具体方法如下。

首先, 确定蛇形机器人的转弯角度  $\phi$ 。

然后, 确定蛇形曲线的切线位置角度  $\psi$ 。

$$\psi(s) = \theta(s) = \alpha \cos(bs) \quad (16)$$

$$\psi_n(t) = \alpha \cos(\omega t + (n-1)\beta) \quad (17)$$

最后, 当  $\psi_n(t_0) = \phi$  时, 令  $\sigma = \pm \frac{\pi}{2} - \omega t_0$  使得新的输入函数为

$$\varphi_i(t) = \begin{cases} A\sin\left(\omega(t-t_0) + (i-1)\beta \pm \frac{\pi}{2}\right) & t \geq t_0 + (n-i)\beta/\omega \\ A\sin(\omega t + (i-1)\beta) & t < t_0 + (n-i)\beta/\omega \end{cases} \quad (18)$$

从而完成转弯动作。

该方法具有转弯准确和转弯半径小的优点。最重要的是在转弯过程中能够始终保持蛇形曲线, 并能一次执行转弯动作。但在转弯时出现角度不连续的现象(如图 8a、b 所示, 图中虚线表示另一种转弯情况), 有时输入角度差值较大。为解决这一现象, 在转弯时也要调整输入角度的幅值使输入角度连续(如图 8c、d 所示)。若要角速度连续, 可以考虑调整输入频率, 但会使波形变化较大。在实际应用中, 用插值方法去拟合这种差值, 实现角度的连续输入, 使机器人运动平稳、波形连续、转弯准确。

比较三种方法的运动曲线与蛇的转弯姿态, 可

以发现相位调整法的运动曲线是最接近蛇的转弯曲线的, 该方法已经被应用到蛇形机器人的控制中。

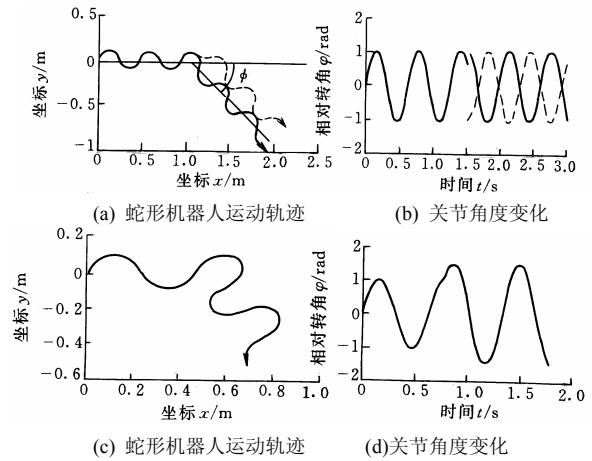


图 8 采用相位调整法的蛇形机器人的运动

## 4 侧移调整方法

沙漠中响尾蛇的运动被称作 Sidewinding, 它能在前进中侧移的运动, 其运动是三维运动。文中用幅值调整法实现与其效果类似的平面运动, 将幅值调整法的计算式(12)改写为如下形式

$$\varphi_i(t) = A[1 + \Delta A \operatorname{sgn}(\cos(\omega t + (i-1)\beta))] \times \sin(\omega t + (i-1)\beta) \quad (19)$$

$$\Delta y = y_{\alpha_1} \left(\frac{\pi}{2b}\right) - y_{\alpha_2} \left(\frac{\pi}{2b}\right) \quad (20)$$

式中  $\Delta y$  ——一个周期内的侧移距离

$y\left(\frac{\pi}{2b}\right)$  ——蛇形曲线波峰距中心轴线的距离

转弯角度的计算比较复杂, 详见参考文献[4]。这里只给出转弯角度的近似计算式(如图 9a 所示)

$$\phi = \alpha\Delta A \quad (21)$$

可以看出蛇形机器人实现了侧移运动(如图 9b、c 所示)。此时的输入角度变化频繁, 因此在下层运

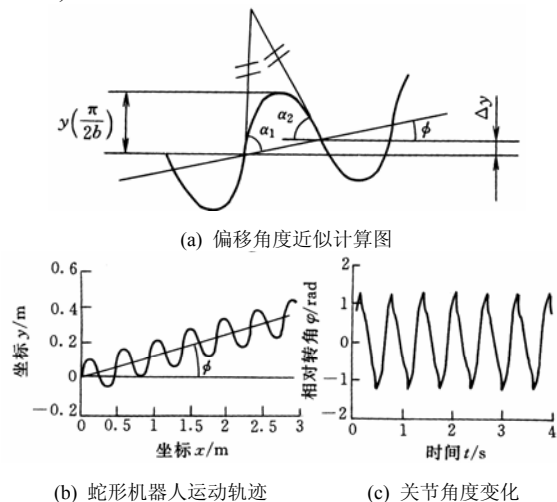


图 9 采用侧移调整方法的蛇形机器人的运动

算中采用了插值方法,使侧移调整简单、快速和有效。

### 5 仿真与试验

根据上面的分析,可以得到控制蛇形机器人的总表达式

$$\varphi_i(t) = A[1 + \Delta A_t \text{sgn}(\sin(\omega t + (i-1)\beta + \sigma))] \times [1 + \Delta A_s \text{sgn}(\cos(\omega t + (i-1)\beta + \sigma))] \times \sin(\omega t + (i-1)\beta + \sigma) \quad (22)$$

式中  $\Delta A_t$  ——转弯调整因子  
 $\Delta A_s$  ——侧移调整因子

建立蛇形机器人动力学仿真模型(如图 5b、6b、7d 所示),将中心调整法和幅值调整法应用到仿真环境,验证了该方法的有效性。由于相位调整法和侧移调整法的加速度是不连续的,无法进行动力学仿真。所以,应用插值方法使角度输入连续,然后将上述所有方法应用到蛇形机器人的试验中,试验结果正确,效果良好。提出的转弯和侧移的调整方法,可以完成蛇形机器人的方向和侧移的自主控制,具体的内容将在以后的文章中介绍。下面给出了机器人的运动试验图片(如图 10~12 所示),箭头表示机器人的前进方向,  $t$  为运动时间(单位秒)。

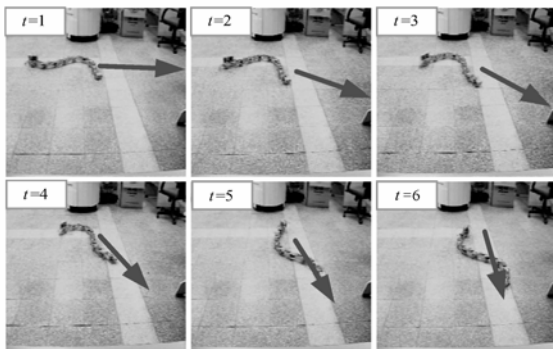


图 10 幅值调整法用于转弯

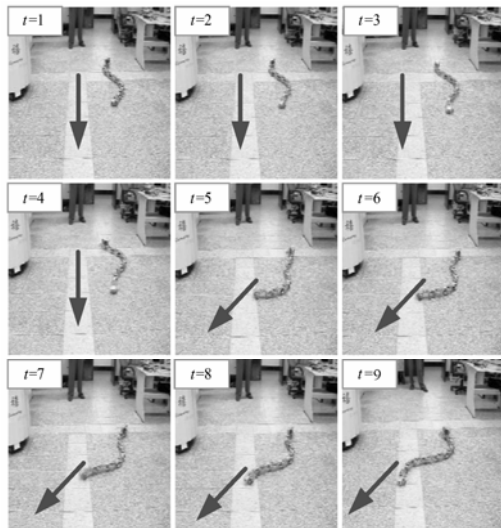


图 11 相位调整法实现转弯

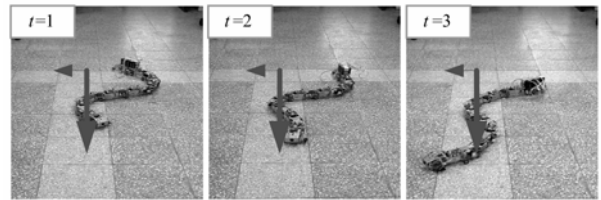


图 12 幅值调整法用于侧移

### 6 结论

介绍了沈阳自动化所研制的蛇形机器人结构。在分析蛇形运动曲线的基础上,提出了幅值调整法和相位调整法两种新的方位调整方法。同时,用相位调整法也可以完成蛇形机器人侧移的调整,该方法简单有效,易于实现。将上述方法应用于蛇形机器人的自动控制,使其在存在滑动的条件下,能够自主完成方向和侧移的调整。分析对蛇形机器人控制有重要意义。

#### 参 考 文 献

- 1 Ma S G. Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot. *Advanced Robotics*, 2001, 15(2): 205~224
- 2 Ma S G. Analysis of snake movement forms for realization of snake-like robots. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, 1999: 3 007~3 013
- 3 Ma S G, Hiroaki A, Li L. Development of a creeping snake-robot. *International Journal of Robotics and Automation*, 2002, 17(4): 146~153
- 4 Hirose S. *Biologically Inspired Robots — Snake-like Locomotors and Manipulators*. Oxford: Oxford University Press, 1993
- 5 Saito M, Fukaya M, Iwasaki T. Serpentine locomotion with robotic snakes. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(1): 64~81
- 6 Togawa K, Mori M, Hirose S. Study on three-dimensional active cord mechanism: development of ACM-R2. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, 2000: 2 242~2 247
- 7 Chirikjian G S. The kinematics of hyper-redundant robot locomotion. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, 11(6): 781~793
- 8 Nilsson M. Snake robot free climbing. *IEEE Control Systems*, 1998, 18(1): 21~26
- 9 Shan Y, Koren Y. Design and motion planning of a mechanical snake. *IEEE Transaction on Systems, Man, and* (下转第 128 页)