

# 一种新型的攀爬蛇形机器人

孙 洪

(苏州市职业大学 电子信息工程系, 江苏 苏州 215104)

**摘 要:** 针对蛇形机器人最常采用的三种关节连接方式: 平行连接、正交连接和万向节连接, 通过典型实例进行了工作空间的分析和比较, 提出了一种具有万向节功能的P-R(pitch-roll)模块. 该模块结构简单、便于控制, 所组成的蛇形机器人理论上可以实现各种三维攀爬动作. 最后通过研制的新型攀爬蛇形机器人样机, 验证了P-R模块的可实现和灵活性.

**关键词:** 蛇形机器人; 平行连接; 正交连接; 万向节连接; P-R模块; 工作空间

**中图分类号:** TP242      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1008-5475(2009)01-0027-05

## A New Style Climbing Snakelike Robot

SUN Hong

(Department of Electronic Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China)

**Abstract:** Three most dominant joints' links, namely parallel link, orthogonal link and universal joint link, of snakelike robot were presented by typical models. Based on examples, their operating spaces were analyzed and compared. Then a new functional module for joints' combination, named Pitch-Roll, was presented. This module has the function of universal joint, but is simpler to implement and easier to control. A snakelike robot based on this link module can theoretically perform all types of maneuvers in 3D spaces. Finally, the prototype of a new type snakelike robot based on the P-R module was produced, which further verified the agility of P-R module.

**Key words:** snakelike robot; parallel link; orthogonal link; universal joint link; P-R module; operating space

蛇形机器人是仿生机器人研究中很活跃的一支, 从1972年日本东京大学的Hirose教授研制出第一台样机至今, 相继有数十台蛇形机器人样机问世. 这些样机能实现在平面上蜿蜒爬行、侧滑、翻滚等二维运动, 在爬行中抬头或爬台阶、翻越较低障碍等三维运动, 而对于更为复杂的如爬树等三维运动则甚为少见. 本文将通过典型实例对几种样机的连接方式进行分析比较, 提出一种新的连接方式, 并基于该连接方式研制蛇形机器人样机, 以期能够开发出结构简单、便于控制、具有多种运动模式的、能爬树的攀爬型蛇形机器人, 它可实现空中侦察、管外壁检测、电杆高空线路维修等功能, 其应用前景十分广阔.

### 1 常见蛇形机器人关节连接方式

蛇形机器人是一种无固定基座、多关节、多自由度的链式柔性机器人, 它由多个相同或相似的单元模块连接组成, 其运动模式和工作空间决定于各单元模块间的连接方式. 综合考察各种样机, 蛇形机器

收稿日期: 2008-11-26; 修回日期: 2009-01-16

作者简介: 孙 洪(1972-), 女, 山东济南人, 讲师, 博士, 主要从事工业机器人和仿生机器人研究.

人不外乎有如下三种关节连接方式：平行连接、正交连接、万向节连接，如图1所示。



图1 三种连接方式的样机

### 1.1 平行连接

平行连接是使用最早也是最多的连接方式。Shigeo Hirose研制的世界上第一台蛇形机器人ACM III<sup>[1]</sup>，国内国防科技大学周旭升等研制的蛇形机器人<sup>[2]</sup>，上海交通大学黄恒等人研制的我国第一台微小型仿蛇机器人样机等<sup>[3]</sup>，均采用的是平行连接方式。由图1(a)可见，所谓平行连接，是组成蛇形机器人的单元模块间均以转动副相连，各转动副的轴线互相平行且垂直于蛇体纵轴线，如图2(a)所示，执行单元为两个连杆铰接，其工作空间是一个二维平面内以连杆长度为半径的圆，如图2(b)所示。数学表示为

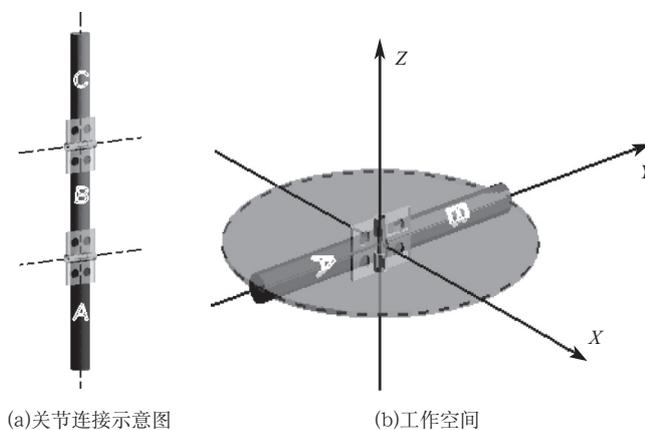


图2 平行连接方式及其工作空间

$$\begin{cases} x=l \sin \alpha \\ y=l \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中： $l$ 为连杆长度， $\alpha$ 为A、B两连杆间关节所转过的角度，其取值范围受关节结构设计的影响。在理想状况下， $\alpha$ 的取值范围是 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 。

### 1.2 正交连接

日本东京工业大学的Makoto Mori等采用正交连接方式研制了周围有轮子保护的ACM-R3<sup>[4]</sup>(参见图1(b))。在结构上采取将组成蛇体的各节一横一竖连接在一起，具备三维运动能力，可以适应一些不规则的三维地形，能实现侧面滚动、螺旋运动、S曲线等各种运动形式。近几年研制的蛇形机器人多采用这种正交连接方式。所谓正交连接，是指组成蛇形机器人的单元模块间仍以转动副相连，但相邻转动副的轴线互相垂直，且均垂直于蛇体纵轴线。如图3(a)所示，执行单元为三个连杆正交铰接，其工作空间是一个内径为0的管式环面，管的截面为以连杆长度

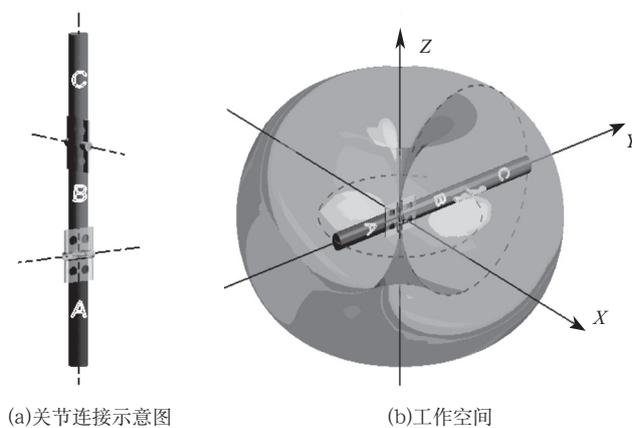


图3 正交连接方式及其工作空间

为半径的圆,如图3(b)所示,数学表示为

$$\begin{cases} x = l(1 + \cos \beta) \sin \alpha \\ y = l(1 + \cos \beta) \cos \alpha \\ z = l \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: $l$ 为B、C两连杆间关节所转过的角度, $\alpha$ 与 $\beta$ 的取值范围均受关节结构设计的影响.在理想状况下,二者的取值范围都是 $[-180^\circ, 180^\circ]$ .

### 1.3 万向节连接

德国的Bernhard Klaassen等人研制的GMD-Snake2<sup>[5]</sup>, Takeshi AOKI等人研制的SSR-II<sup>[6]</sup>, NEC公司的Takanashi等人研制的Orochi(参见图1(c))等均是万向节结构的蛇形机器人. Orochi是一种由球状关节相连的蛇形机器人,每个单体是一个细圆柱,可绕相邻单体做 $360^\circ$ 的球面旋转,并在身体两侧装了一些微型的金属托架,来增加身体稳定性.这里的万向节连接是指球形万向节连接如图4(a)所示,关节能够向任意方向转动.执行单元为两个连杆铰接,其工作空间是以关节连接处为圆心,以连杆长度为半径的一个球面,如图4(b)所示.数学表示为

$$\begin{cases} x = l \sin \theta \cos \varphi \\ y = l \sin \theta \sin \varphi \\ z = l \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\theta$ 与 $\varphi$ 分别为连杆B与X轴和Z轴的夹角,在理想状况下,二者的取值范围都是 $[-180^\circ, 180^\circ]$ .

蛇形机器人在结构方面采用万向节连接是最为灵活的,但其制作成本和加工精度很高,复杂的结构导致控制也变得复杂.同时,由于球状关节的不稳定性,使得在垂直方向能连续抬起的节数很少,相对于平行连接和正交连接,万向节连接通过抬头所能达到的高度是最低的.

### 1.4 三种连接方式的比较

由分析可见,平行连接与正交连接的工作空间都是有限的,采用这两种连接方式的蛇形机器人很多动作不能实现,在复杂的三维环境中难以应用和推广.而万向节连接具有完整的三维工作空间,大大提升了采用这种连接方式的蛇形机器人动作的复杂性,具有最广泛的应用领域.因此蛇形机器人的设计以采用万向节连接方式为最理想.

另一方面,平行连接和正交连接蛇形机器人关节处只有一个电机动作,结构简单,控制也简单.而万向节结构复杂,在一个关节处需要两个或三个电机同时动作,一个转角的实现需要几个角度配合输出,复杂的结构和输出使得控制也变得复杂.

本文在这三种连接方式的基础上进行改进,设计一种能够同时具有上述两方面优点的关节模块.

## 2 P-R模块关节设计

### 2.1 P-R模块

无论平行还是正交连接,各关节轴线均处于彼此平行且都垂直于蛇体纵轴的平面内.在这样的两个关节之间添加一个轴线与蛇体纵轴重合的转动关节,即在两个俯仰(pitch)运动的关节之间添加一个横滚(roll)运动的关节,如图5(a)所示.把以pitch-roll方式

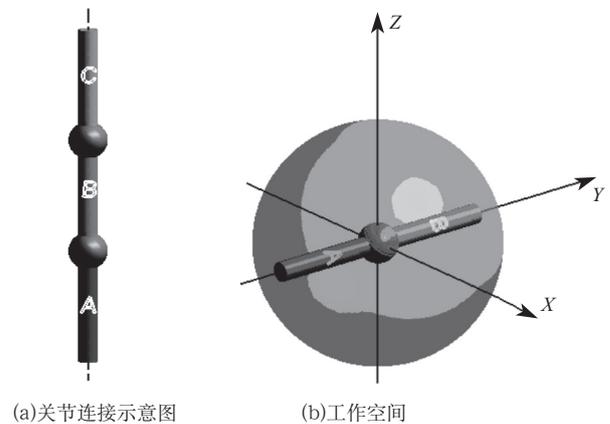


图4 万向节连接方式及其工作空间

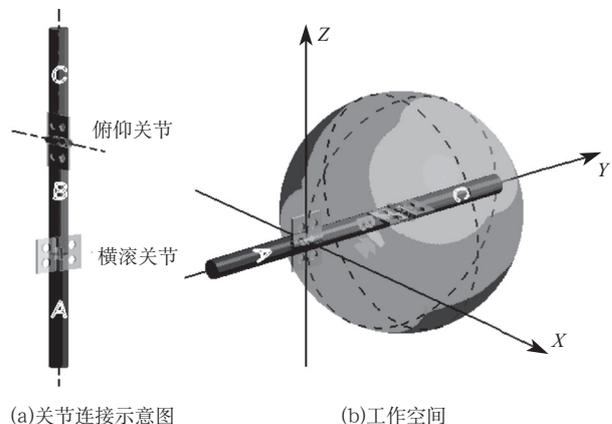


图5 万向节连接方式及其工作空间

连接的两个关节作为一个执行单元,称为P-R模块.由于R关节的存在,使得P关节的另一端可以向任意方向转动.其工作空间是一个以B、C两连杆间关节为圆心,半径等于连杆长度的球体,如图5(b)所示.数学表示为

$$\begin{cases} x = l \sin \beta \sin \alpha \\ y = l(1 + \cos \beta) \\ z = l \sin \beta \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\alpha$  与  $\beta$  的取值范围均受关节结构设计的影响.在理想状况下,  $\alpha$  的取值可以是  $[-\infty, +\infty]$ ,  $\beta$  的取值范围是  $[-180^\circ, 180^\circ]$ .这个工作空间与万向节连接相似,也包含全部三维空间.也就是说,一个P-R模块即可相当于一个万向节.

## 2.2 P-R模块的特点

一个P-R模块在功能上相当于一个万向节,但是,其结构与控制却很简单,比真正的万向节更容易实现.基于P-R模块的蛇形机器人,能够完成相对较多的三维空间运动如爬树等,因此可称为攀爬蛇形机器人.又因为各关节的连接呈P-R-P-R-P-R...状,当连接于R关节转动副两端的两个P关节的轴线平行时,相当于一平行连接的蛇形机器人;当两个P关节的轴线垂直时,相当于一正交连接的蛇形机器人.

虽然由于P关节的存在,使得P-R模块组成的蛇形机器人单元长度相对较长,但在大部分对单元长度要求不严格的场合,这样的组合方式有显著优势.

类似的关节组合设计在文献[7]中可以看到,瑞典的Martin Nilsson研制了一种名为“dragon 1 joint”的关节,与本文所提出的P-R模块不同的是,将产生俯仰和横滚两个动作的电机放在一个关节里实现,实现起来仍然比较复杂.而且作者也并没有将这种结构真正用于蛇形机器人的制作.

## 2.3 P-R模块结构设计

蛇形机器人的特点就是高冗余度和高模块化.攀爬蛇形机器人的目标是能够在三维空间中动作,由于在攀爬过程中周身均有可能与环境表面接触,为保证接触点的均匀和有效,采用管套式结构,即将各节的构件都套在一个管子里.依据简单、多能、高效、便于维护、容易控制的原则,设计了如图6(a)所示的P-R模块.该模块由伺服电机、伺服电机固定架、套筒、套筒连接件构成,P关节可有的活动范围,如图6(b)所示.

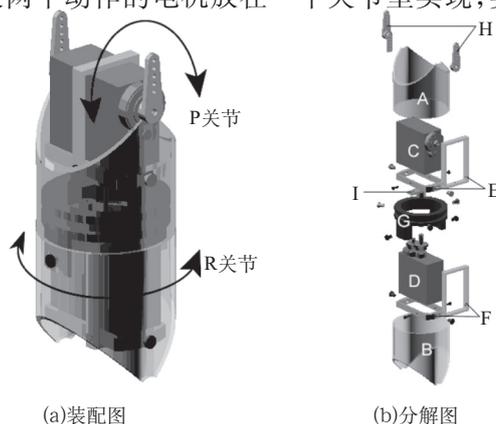


图6 P-R模块

## 3 样机实验

攀爬蛇形机器人样机由15个P-R模块组成.选择PVC管作为管套以减轻质量,并在外面包裹一层橡胶以增大摩擦系数.因为单节长度越小,CSR的适应性就会越高,所以根据电机的尺寸及两个电机的相对运动所需最小空间,单个套筒的长度  $l$  定为54 mm.一个P-R模块的质量由下列各部分相加组成:电机76 g;外径50 mm的PVC管套质量为30 g;连接件64 g;数据线10 g,总质量为180 g.选择额定电压为6 V的伺服电机作为驱动装置.

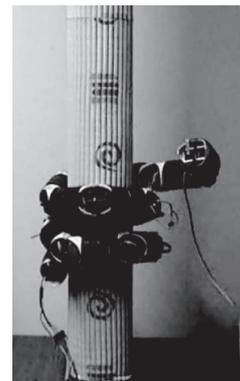
实验选择外径为110 mm的PVC管并在外面包裹不同材质的表皮作为攀爬物,通过缠绕爬树动作的实验验证具有P-R结构的新型蛇形机器人能够像万向节结构的蛇形机器人一样具备很好的三维灵活性.图7所示为实验结果.在摩擦系数较大的表面,能使蛇形机器人缠绕并紧贴在攀爬物上保持静止而不下落的螺旋升角较大,如图7(a)所示.在摩擦系数较小的表面,这个螺旋升角较小,如图7(b)所示.在摩擦系数较大的表面,减小螺旋升角,并将蛇体的一部分离开缠绕物,蛇形机器人仍能保持静止,如图7(c)所示.此时,基于一定的控制规则,蛇形机器人还可以实现上下攀爬,这将在另外一篇文章中进行论述.



(a)大螺旋升角



(b)小螺旋升角



(c)向外探身

图7 实验结果

## 4 结 论

本文采用P-R模块所研制成功的一种新型的具有攀爬功能的蛇形机器人,能实现灵活的三维运动.当前大部分采用平行连接或正交连接的蛇形机器人甚至一端固定的柔性机器人或机械臂,均可通过简单的改造,变成P-R模块连接方式,从而大大提升其灵活性和工作空间.

### 参考文献:

- [1] ENDO G, TOGAWA K, HIROSE S. Study on self-contained and terrain adaptive active cord mechanism[J]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999, 3: 1399-1405.
- [2] 周旭升,潘献飞,谭红力,等. 一种蛇形机器人的研制[J]. 机器人, 2002, 24(7): 684-687.
- [3] 黄 恒,颜国正,丁国清,等. 一类蛇形机器人系统的运动学分析[J]. 高技术通讯, 2002, 6(3): 90-94.
- [4] MAKOTO M, SHIGEO H. Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3 [J]. Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl, 2002, 1: 829-834.
- [5] BERNHARD K, KARL L P. GMD-Snake2: a snake-like robot driven by wheels and a method for motion control [J]. Proc. of the Internet Content Rating Association, 1999: 3014-3019.
- [6] AOKI T, OHNO H, HIROSE S. Study on pneumatic mobile robot: design of SSR-II using bridle bellows mechanism [J]. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference , 2002, 3(5/7): 1492-1496.
- [7] NILSSON M. Why snake robots need torsion-free joints and how to design them [J]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 1: 412-417.

(责任编辑: 尚 丽)