

文章编号: 1002-0446(2003)05-0419-05

## 基于耦合驱动蛇形机器人机构设计与抬起的方法\*

叶长龙<sup>1,3,4</sup>, 马书根<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 王越超<sup>1</sup>

(1. 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110015; 2. 日本茨城大学系统工程系;  
3. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110023; 4. 中国科学院研究生院 100039)

**摘要:** 文中设计了模块化的新型蛇形机器人关节单元. 该单元具有三个自由度, 其中摆动和俯仰自由度由耦合机构驱动来获得较大的力矩和活动空间. 由该单元组成的蛇形机器人具有很强的驱动能力, 能够抬起较多的单元. 针对蛇形机器人的特点, 给出了耦合机构的设计原则. 对蛇形机器人抬起方法作了分析, 得出采用适当规划方法能够抬起的最大单元数量是直接抬起的最大单元数量的平方关系的结论, 并在此基础上分析了最大关节角对机器人抬起的影响, 最后结合实例验证了上面分析结果.

**关键词:** 蛇形机器人; 耦合; 模块化; 抬起方法  
**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

### COUPLED DRIVE BASED JOINT DESIGN OF A SNAKE ROBOT AND ITS BODY-LIFTING METHOD

YE Chang-long<sup>1,3,4</sup>, MA Shu-gen<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, WANG Yue-chao<sup>1</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Shenyang 110016, China; 2. Department of Systems Engineering, Ibaraki University;  
3. Shenyang University of Technology, 110023; 4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences 100039, China)

**Abstract:** A novel joint mechanism for snake-like robot has been designed, which has 3 degrees of freedom among them 2 degrees of freedom are driven through coupled drive. The snake-like robot composed of these joints can acquire larger moment and larger workspace. In this paper, we present the principle of the joint design that is based on coupled drive, and introduce the lifting method of the snake-like robot and the effect of maximum joint angle  $\alpha$ . Through the analysis, we draw a conclusion that the number of units that the snake-like robot possibly lifts is the square of the number of units that the snake-like robot can directly lift. This is also confirmed by a simple example.

**Key words:** snake-like robot; coupled drive; modularization; lifting method

#### 1 引言 (Introduction)

移动机器人的研究倍受科学家和社会各界的关注并取得了很大成绩, 特别是传统的移动机器人——轮式移动机器人和腿式移动机器人. 但这两类移动机器人由于自身结构上的原因, 对周围环境有着一系列的要求. 例如: 轮式移动机器人很难跨越大于其轮子半径的障碍物, 而腿式移动机器人在沙地或沼泽地带很难行走, 同时两类机器人的体积一般比较大不能在狭小空间工作. 而蛇形机器人却能够以一种全新的运动方式轻松地跨越障碍物、穿越沙地和沼泽, 并且能够在狭小空间完成复杂作业.

目前, 对蛇形机器人的研究主要以日本、欧洲和美国为代表<sup>[3,7]</sup>. Hirose<sup>[4]</sup>较早就开始蛇形机器人的研究, 并从仿生角度提出了大量有关蛇形机器人的

理论. Ma<sup>[1,2]</sup>对蛇形机器人运动机理及动力学做了大量工作. Chirikjian<sup>[5]</sup>对蛇形机器人的运动做了详细研究.

本文设计了新型蛇形机器人关节单元, 并提出该类单元应满足的设计原则. 由于蛇形机器人通常以爬行方式运动致使获得的视觉信息有限, 当在复杂环境运动时, 必须抬起较多单元来获得环境信息和翻越障碍. 因此, 文中对蛇形机器人抬起方法作了详细分析, 得出采用恰当规划方法的蛇形机器人能够抬起的单元数量是直接抬起单元数量的平方.

#### 2 蛇形机器人机构设计 (Mechanism design of snake like robot)

蛇形机器人具有超冗余自由度, 能够轻松地完成各种复杂作业. 例如: 绕过障碍物, 进入狭小空间.

\* 基金项目: 国家 863 计划项目资助(2001 AA422360).

收稿日期: 2003 - 03 - 20

但同时也存在一系列技术问题,关节驱动就是主要问题之一.超冗余机器人本身单元数多,要求关节具有很大的驱动力.因此,一方面应设计合适的驱动机构以增加驱动力,另一方面应减小各单元自身重量从而减小所需驱动力<sup>[1]</sup>.

### 2.1 耦合驱动机构设计

由于直接驱动关节机构采用每个自由度直接用一个电机来驱动,用减少传动件的数量来达到减轻单元重量的目的,但效果有限.而耦合驱动是采用合适的机构使原来分别驱动不同自由度的电机共同驱动几个自由度,充分利用驱动资源,从而大大增加了机构的驱动力.虽然耦合驱动在控制上存在解耦问题,但通过充分利用现有的计算机技术可以很容易得到解决.

考虑到连杆系统建模困难,柔索系统存在刚性问题,而齿轮机构具有结构紧密,活动空间大,建模容易的特点,我们选择齿轮机构作为耦合驱动机构.在此基础上,我们设计了耦合驱动的模块化万向单元.此单元具有圆柱形铝合金外壳,具有3个自由度(见图1),分别是回转——由位于中间位置的直流伺服电机直接驱动;俯仰和摆动——由左右两个直流伺服电机通过差动轮系耦合驱动(图2),其中差动轮系由三个伞齿轮组成,通过与左右两个电机相连的两对伞齿轮驱动.由图2可以得出,当两个电机同向同速转动时,共同驱动单元做摆动运动;当同速反向转动时,共同驱动单元做俯仰运动;当两个电机以不同速度转动时实现的是既有摆动又有俯仰的复合运动.控制电路集成在整个单元中,两个电位计与齿轮相连用来提供位置信息(图1).该单元的活动空间是俯仰角( $-90^\circ, 90^\circ$ ),摆动角( $-90^\circ, 90^\circ$ ),回转角( $-180^\circ, 180^\circ$ ).由于该单元具有三个自由度和较大的活动空间,因此由该单元组成的蛇形机器人具有很强的适应性和活动能力<sup>[8]</sup>.由于篇幅有限,有关蛇形机器人的运动原理请参见文献[2,4,5].

为便于单元的拆装和减少设计及制造成本,该蛇形机器人单元采用了模块化设计.此外,模块化设计可以实现蛇形机器人的可重构,通过不同的连接可以组合成不同形状的机器人.

### 2.2 蛇形机器人耦合驱动单元设计原则

耦合机构虽然能够给蛇形机器人单元带来较大驱动力,但同时也增加了每个单元的重量、长度,降低了每个单元传动机构的传动效率,具有一定的负面影响.因此,在设计每个单元时,必须考虑到这些因素所带来的影响,权衡耦合驱动机构与直接驱动

机构,从而选择更加合理的耦合驱动机构.耦合机构所带来的正面效果一定要大于由此带来的负面影响,否则就失去耦合驱动的意义.

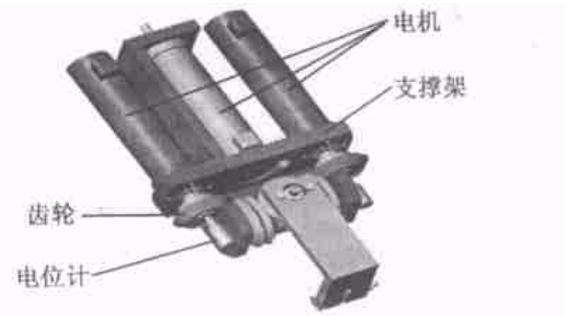


图1 蛇形机器人单元

Fig.1 The unit of snake-like robot



图2 传动原理图

Fig.2 The transmission principle

设计耦合驱动机构主要目的是使蛇形机器人具有较大驱动力来抬起尽量多的单元,从而具有更强的运动能力(参见图3).让机器人以较低的速度运动,忽略惯量和动力学效果,并将每个单元的重心近似取在它的中间位置,那么蛇形机器人抬起时关节力矩的计算如下:

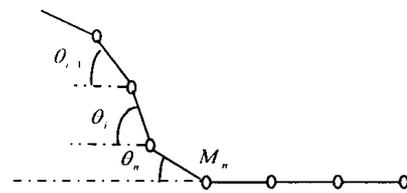


图3 力矩计算图

Fig.3 Fig.3 The schematic diagram of moment

$$M_1 = \frac{1}{2} mgl \cos \theta_1$$

$$M_2 = \frac{1}{2} mgl (\cos \theta_1 + 3 \cos \theta_2)$$

...

$$M_n = \frac{1}{2} mgl (\cos \theta_1 + 3 \cos \theta_2 + \dots + (2n - 1) \cos \theta_n)$$

$$= \frac{1}{2} mgl \sum_{i=1}^n (2i - 1) \cos \theta_i$$

(1)

其中： $\theta_n, M_n$ ——分别为单元  $n$  与水平面的夹角和抬起单元  $n$  所需力矩，并很容易得出  $\theta_i$  与各个关节变量  $q_i$  之间的关系

$$\theta_i = \sum_{j=1}^n q_j \quad (2)$$

其中：关节变量  $q_i$  为第  $i$  个单元相对于第  $i+1$  单元的转角。蛇形机器人耦合驱动关节设计的计算原则如下：

当以相同的规划方式抬起时，采用耦合机构的机器人抬起的单元数量要大于用相同电机采用直接驱动机构的机器人抬起的单元数量。也就是说，采用耦合机构的机器人能够抬起  $n$  个单元(式 3)，而采用直接驱动机构的机器人将不能抬起  $n$  个单元(式 4)。由式(1)得

$$M_n = \frac{(mg + \Delta mg)(l + \Delta l)}{2} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \cos \theta_i < 2\eta M_{\max} \quad (3)$$

$$M_n = \frac{mgl}{2} \sum_{i=1}^n (2i - 1) \cos \theta_i > M_{\max} \quad (4)$$

其中： $m$ ——单电机直接驱动力的每个单元的质量；  
 $l$ ——直接驱动的每个单元的长度；  
 $\Delta m$ ——加入耦合机构后增加的质量；  
 $\Delta l$ ——加入耦合机构后增加的长度；  
 $M_{\max}$ ——单电机直接驱动时的最大输出力矩；  
 $\eta$ ——由于采用耦合机构带来的效率变化。

由(3)，(4)式：

$$1 + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta m \Delta l}{ml} < 2\eta \quad (5)$$

公式(5)可写为如下形式：

$$k_l + k_m + k_m k_l < 2\eta - 1 \quad (6)$$

其中： $k_l = \frac{\Delta l}{l}$ ——耦合机构带来的单元长度增长率；

$k_m = \frac{\Delta m}{m}$ ——耦合机构带来的单元质量增长率；

耦合机构的设计具有很大的复杂性，因此采用耦合机构应使力矩增加效果十分明显，否则将事倍功半。设计过程中应留有很大的余量，即应尽量使不等式(6)两边的差值加大。进一步完善该公式，由于  $k_l < 1, k_m < 1$ ，所以  $k_l + k_m + k_m k_l < k_l + k_m + k_m + k_l = 2(k_l + k_m)$ ，使公式(6)两边差值加大，令

$$2(k_l + k_m) < 2\eta - 1$$

即  $k_l + k_m < \eta - \frac{1}{2}$  (7)

公式(7)说明，如果我们设计的关节单元满足该式，那么公式(6)两边的差值将加大，使耦合机构的效果

明显。公式(7)为我们所设计蛇形机器人的关节单元依据的基本原则，我们采用的耦合机构使单元改变的参数为： $k_l = 0.17, k_m = 0.18, \eta = 0.89$ ，代入公式(7)得： $k_l + k_m = 0.35 \leq \eta - 0.5 = 0.39$ ，说明我们采用的耦合机构是比较恰当的。

### 3 蛇形机器人抬起方法分析 (Analysis of snake like robot lifting)

蛇形机器人能够在各种恶劣环境下运动和操作。不仅在设计过程中尽量提高其力矩性能，而且要对蛇形机器人的运动方法加以研究，使其能够翻越较大障碍物。

#### 3.1 蛇形机器人能够抬起最多单元数的计算

通常，蛇形机器人最简单的抬起方法是直接抬起  $n$  个单元，这时  $n$  个单元成一条直线(参见图 4)。

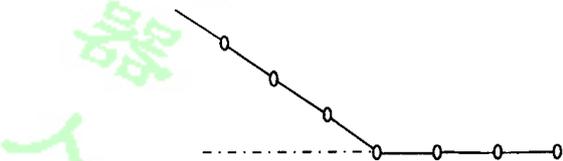


图 4 直接抬起

Fig. 4 Directly lifting

该方法虽然运动规划简单，但需要的驱动力矩较大，即机器人能够抬起的单元数量很少。因此需要对机器人抬起运动作适当的规划使其抬起尽可能多的单元。比较实际的方法是当第  $n$  个单元要抬起时，其它  $n-1$  个单元的重心调整到适当位置使机器人抬起所需力矩减小。蛇形机器人能够抬起第  $n$  个单元的条件是前  $n$  个单元对第  $n$  个关节的力矩小于单元的额定驱动力矩(见图 5)。

$$M_n = G_n(l - l_c) \leq M_{\max} \quad (8)$$

同时第  $n-1$  关节应有能力使第  $n$  关节抬起  $n$  个单元，即已抬起的  $n-1$  个单元对第  $n-1$  个关节的力矩小于单元的额定驱动力矩：

$$M_{n-1} = G_n l_c - \frac{1}{2} mgl \leq M_{\max} \quad (9)$$

其中： $l$ ——单元长度；

$l_c$ ——抬起第  $n$  个单元时，将被抬起的全部单元的重心在水平面的投影点  $c$  距  $n-1$  关节点的距离；

$l - l_c$ ——投影点  $c$  与第  $n$  关节点的距离；

$G_n$ —— $n$  个单元的总重量；

$M_{\max}$ ——耦合驱动单元的额定力矩。

由(8)，(9)得

$$G_n \leq \frac{2M_{\max}}{l} + \frac{1}{2} mg \quad (10)$$

式(10)说明在采取适当运动规划的情况下,抬起单元的总重量也是受到关节力矩的限制的,反映出抬起的最多单元重量与关节力矩的关系.

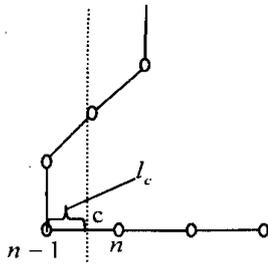


图5 最多关节计算图

Fig.5 The computing maximal number of lifting units

设关节力矩最多能够直接抬起 \$p\$ 个单元(图3),则由式(1)得

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p (2i - 1) mgl = \frac{1}{2} p^2 mgl \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式得

$$G_n = nmg \leq p^2 mg + \frac{1}{2} mg \quad (12)$$

由于 \$n\$ 为整数,将式(12)取整得机器人能够抬起的最多单元数应为

$$n = p^2 \quad (13)$$

式(13)说明:蛇形机器人实际能抬起的单元数量是其能直接抬起单元数量的平方.反之,如果我们想通过有效的运动规划抬起 \$n\$ 个关节,由(13)和(11)式可以得出每个单元需要的最大驱动力矩为

$$M_{\max} = \frac{1}{2} n mgl \quad (14)$$

式(14)说明:采取有效运动规划使得最大驱动力矩与单元数 \$n\$ 成正比.注意上面的分析的前提是关节角满足运动的要求.

还应注意,式(13)是在取整过程中略去半个单元重量的情况下得出的,如果机器人的关节力矩在能够直接抬起 \$p\$ 个单元的情况下仍有一定的余量这时

$$n = p^2 + x \quad (15)$$

其中: \$0 \leq x < (p+1)^2 - p^2\$, 且 \$x\$ 为整数,所以 \$x \in \{0, 1, 2, \dots, 2p\}\$, \$x\$ 的具体值应由式(10)得出.但考虑到动力学的因素通常我们要保留一定的电机力矩余量,故经常略去 \$x\$.

我们设计的耦合机构驱动的单元能够直接抬起3个单元,因此,由该机构组成的蛇形机器人最多能够抬起的单元数为 \$n=9\$.上面分析未考虑关节角约束,而实际上,由于关节角的限制,蛇形机器人并不总能调整抬起部分的重心到达处在 \$c\$ 点的垂直线

上,所以有必要对关节角进行分析.

### 3.2 最大关节角 \$\alpha\$ 对抬起单元数的限制

除力矩特性外,蛇形机器人的另一重要参数是最大关节角 \$\alpha\$ (\$\alpha\$ 为关节变量的最大值),它不仅限制着蛇形机器人在水平面的运动能力,而且对机器人的越障和观测能力也有很大影响. \$\alpha\$ 决定着蛇形机器人已抬起的各个单元调整重心位置的能力.如果 \$\alpha\$ 值过小就不能将抬起部分的重心调整到图5所示的 \$c\$ 点所在的垂直线上,那么机器人的越障高度将受到严重限制.将 \$\alpha\$ 以关节变量的形式代入(2)求出 \$\theta\_i\$, 将 \$\theta\_i\$ 代入公式(1),得出单元数量, \$\alpha\$, 力矩三者之间的关系(图6).

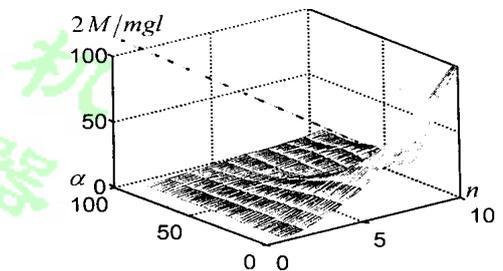


图6 单元-\$\alpha\$-力矩图

Fig.6 Units-\$\alpha\$ moment

可以看出: \$\alpha\$ 值较小时,力矩随单元数量的增加以平方关系增长; \$\alpha\$ 值大于 \$50^\circ\$ 时,增长将明显减小且打破平方关系,而且力矩并不是随着 \$\alpha\$ 的增加连续增加,而是在某几个关节出现无增长或负增长.图7是在 \$\alpha=90^\circ\$ 时的力矩与单元数量关系图,此时,第3个关节力矩和第4个关节力矩相同.这是由于 \$\alpha\$ 值使机器人的构形处在相差一个单元就组成封闭的多边形状态和多边形状态(图8中上面两个图).而图7中第7个关节力矩和第8个关节力矩相同,说明构形又一次处在相差一个单元就组成封闭的多边形状态和多边形状态,只不过在层次上比上次多了一个多边形.图7中下面两个构型图是 \$\alpha=60^\circ\$ 时的构型图,此时,第6关节力矩小于第5关节力矩,并在抬起第6个单元时组成正六边形.可得出这样的结论:蛇形机器人以最大关节角 \$\alpha\$ 顺次抬起个个单元,当关节力矩无增长或负增长时,机器人构形为正多边形状态.这时,合理更改构形就能够调整重心位置以减小此单元后的单元的驱动力矩.那么只有在组成封闭多边形之前的最大力矩小于额定输出力矩的情况下,才能应用式(10)求解能够抬起的最大单元数.我们设计的蛇形机器人单元关节角 \$\alpha=90^\circ\$,则该机器人抬起至第4单元就组成正方形(图8上右).而在此之前以角 \$\alpha\$ 抬起的最大力矩为 \$2 mgl < M\_{\max} = 4\$.

5  $mgL$ , 并根据上一部分关于抬起最多单元数量的分析, 说明该机器人完全能够抬起 9 个单元。

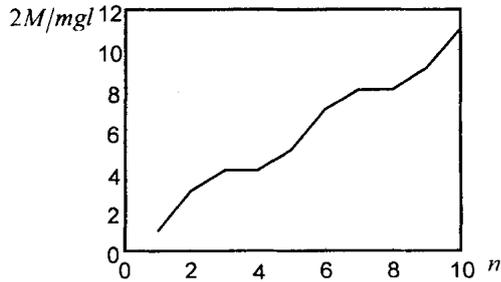


图 7 单元数-力矩图

Fig. 7 Number of units- moment

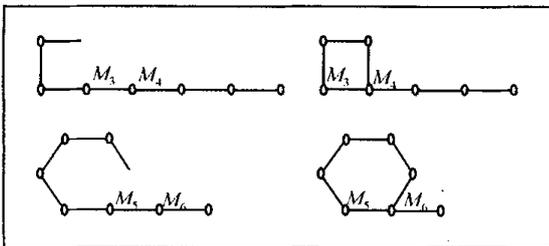


图 8 构形图

Fig. 8 The scheme of pose

#### 4 应用实例 (Application example)

上面分析说明合理的运动规划能够使机器人抬起更多的单元. 下面以我们设计的机器人为例来阐述规划方法. 其算法是:

(1) 抬起第  $n$  个关节到垂直位置, 然后调整抬起部分构形使第  $n+1$  个单元能够抬起;

(2) 令  $n = n+1$  转到(1)。

蛇形机器人抬起 9 个单元的规划 (见图 9). 图中虚线表示调节抬起部分重心的单元。

#### 5 结论 (Conclusion)

本文设计了 3 自由度模块化的蛇形机器人单元. 阐述了耦合驱动机构, 针对蛇形机器人的特点, 提出了耦合机构设计原则. 由该单元组成的蛇形机器人具有三维运动能力, 具有很大柔性 and 驱动力矩, 能够适应各种恶劣环境. 例如: 沙地, 沼泽, 树丛等, 特别是能够抬起较多的单元, 从而轻松跨越障碍物和获得环境信息. 推出了经合理的运动规划蛇形机器人能够抬起的最大单元数量是直接抬起的最大单元数量的平方的结论, 分析了关节活动空间对力矩

特性的影响, 并针对我们设计的机器人作了恰当的运动规划. 本文的设计与分析能够提高蛇形机器人的运动性能。

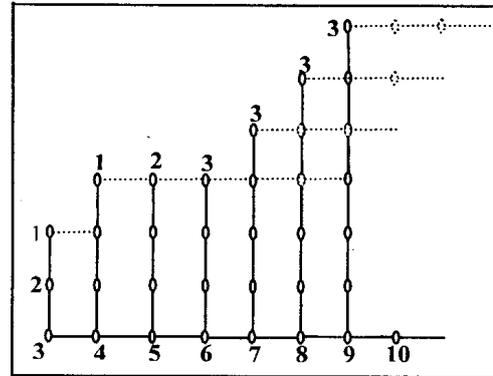


图 9 9 个单元抬起规划图

Fig. 9 The scheme of lifting 9 units

#### 参考文献 (References)

[ 1 ] Shugen Ma . Minimum-time control of coupled tendon-driven manipulators [ J ] . Advanced Robotics , 2001 , 15 ( 4 ) : 409 - 427 .

[ 2 ] Shugen Ma . Analysis of creeping locomotion of a snake-like robot [ J ] . Advanced Robotics , 2001 , 15 ( 2 ) : 205 - 224 .

[ 3 ] Yansong Shan and Yoram Koren . Design and motion planning of a mechanical snake [ J ] . IEEE Transaction on Systems , Man , and Cybernetics , 1993 , 23 ( 4 ) : 1091 - 1100 .

[ 4 ] Shigeo Hirose . Biologically inspired robots ——snake-like locomotors and manipulators [ M ] . Oxford : Oxford university press , 1993 .

[ 5 ] Gregory S. Chirikjian . The Kinematics of hyper-redundant robot locomotion [ J ] . IEEE Transactions on Robotics and Automation , 1995 , 11 ( 6 ) : 781 - 793 .

[ 6 ] Sungmo Ryew and Hyoukryeol Choi . Double active universal joint ( DAUJ ) : Robotic Joint Mechanism for Humanlike Motions [ J ] . IEEE Transactions on Robotics and Automation , 2001 , 17 ( 3 ) : 290 - 300 .

[ 7 ] Martin Nilsson . Snake robot free climbing [ J ] . IEEE Control Systems , 1998 , February : 21 - 26 .

[ 8 ] Changlong Ye , Shugen Ma , Bin Li , Li Chen . Coupled-actuation modular universal unit ( MUU ) of snake-like robot [ A ] . Proceedings of China-Japan Symposium on Science and Technology in the 21st Century [ C ] . Beijing : July 2002 : 153 - 158 .

作者简介:

叶长龙 (1974-), 男, 在职博士生, 讲师. 研究领域: 仿生机器人。

马书根 (1963-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 机器人机构, 机器人控制, 仿生机器人, 超冗余机器人, 机器人视觉。