

具有万向机构的蛇形机器人运动控制

叶长龙^{1,2,4} 马书根^{1,3} 李 斌¹ 王越超¹

1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳, 110016

2. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳, 110023

3. 日本国立茨城大学工学部, 茨城县, 日本

4. 中国科学院研究生院, 北京, 100039



叶长龙 讲师

摘要: 设计了一种能够使蛇形机器人运动更灵巧、奇异点更少和运动能力更强的机构, 对具有三个自由度的新型蛇形机器人单元进行了改进, 在单元上增加被动轮机构, 使其具有万向机构的特点。该单元不仅能够用被动轮驱动机器人运动, 而且增加了类似于主动轮的驱动机构, 克服了被动轮驱动能力弱的缺点, 增强了机器人的运动能力。在分析非完整约束的基础上, 对蛇形机器人的运动学和冗余度进行分析, 提出了控制该类蛇形机器人运动的分解矩阵方法和分组交替运动法。

关键词: 蛇形机器人; 万向机构; 非完整约束; 运动学控制

中图分类号: TP24 **文章编号:** 1004-132U(2004)24-2235-06

Locomotion Control of a Snake-like Robot with Omnidirectional Mechanisms

Ye Changlong^{1,2,4} Ma Shugen^{1,3} Li Bin¹ Wang Yuechao¹

1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016

2. Shenyang University of Technology, Shenyang, 110023

3. Ibaraki University, Ibaraki, Japan

4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039

Abstract: By adding a serial of passive wheels to the perimeter of the newly designed joint mechanism with 3 DOFs, a snake-like robot provided with the characteristics of omnidirectional mechanism can traverse rough terrain and compensate the lack of actuation due to passive wheels. The nonholonomic constraints and robot kinematics were analyzed as well as the redundancy. The composite motion method and grouping alternation motion control method were thus proposed for the locomotion of robot and the avoidance of singularity. Also, the grouping alternation motion adds a new explanation to the sinus lifting locomotion of natural snake.

Key words: snake-like robot; omnidirectional mechanism; nonholonomic constraint; locomotion control

0 引言

具有多种运动方式的蛇形机器人有广泛的应用前景,可应用到星球探测、抢险救灾、医疗、设备维护和军事等方面。近年来,研究人员对蛇形机器人进行了大量研究分别研制了各具特点的蛇形机器人^[1~13]。但这些蛇形机器人总体上具有驱动能力弱和灵活性差的缺点。为此,笔者设计了具有三个自由度的蛇形机器人单元。

1 新型蛇形机器人机构设计

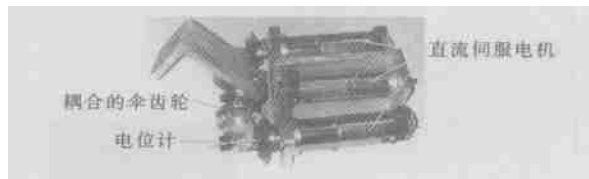
机器人的机构是机器人实现各种运动的基础和保证。在实验中笔者发现单自由度单元组成的

蛇形机器人在结构上还有很多不足,因此,为使蛇形机器人具有更强的运动能力,能够应用到各种环境中进行作业,笔者设计了具有三个自由度(俯仰 α 、偏转 β 和回转 γ)的蛇形机器人单元。该机构的特点如下:¹ 无奇异点,运动灵巧、迅速。² 利用该单元能够实现回转的特点,在其周边增加被动轮。这样,将回转自由度的主动轮特点与被动轮机构结合起来使该单元成为万向机构(见图1)。类似主动轮机构的出现可以充分弥补被动轮机构在运动能力上的不足。改进后的机构充分利用了轮子驱动的特点,而且仍具有使蛇形机器人有效运动的被动轮机构,又具有万向运动的特点,为机器人提供了更多的运动方式(见图2)。³ 工作空间大,摆动 $\pm\pi/2$,俯仰 $-\pi/2\sim 2\pi/3$,回转 $\pm 2\pi$ 。⁴ 采用耦合驱动原理驱动,具有较大的输出力矩,可以完成复杂的三维运动。⁵ 两个单元

收稿日期: 2004-03-18

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (2001A A422360)

连接起来后, 就可以实现平面运动, 为蛇形机器人的自动可重构提供了有利条件。



(a) 单元内部结构



(b) 单元外部结构

图 1 新型蛇形机器人单元



图 2 新型蛇形机器人的万向运动

由该机构组成的蛇形机器人具有很强的三维环境运动能力。本文主要研究二维运动, 利用该蛇形机器人完成二维环境的运动来证明该机构的优越性。机构具有的三个自由度能够使其完成各种复合动作, 当作二维运动时, 应根据运动学方程对三自由度解耦, 解出二维运动变量 γ, ϕ 与三个输入变量 α, β, γ 之间的关系, 见图 3。通过运动学解耦来控制二维运动变量 γ, ϕ , 使蛇形机器人有效运动。

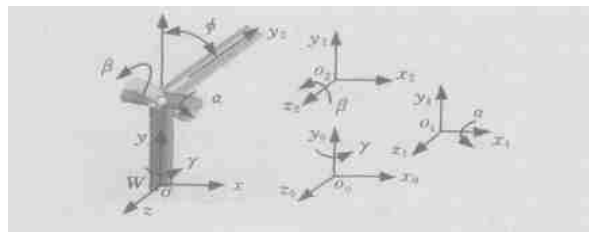


图 3 运动学解耦

该机构的运动学为

$$\text{Rot}(y_0, \gamma)\text{Rot}(x_1, \alpha)\text{Rot}(z_2, \beta) = {}_2^W R \quad (1)$$

${}_2^W R$ 必须满足以下两个条件:

- 条件 1 两连杆夹角为平面内的转角 ϕ 。
- 条件 2 运动后两连杆仍在同一平面内, 即 $y_2 \subset xoy$ 。

由约束条件 1、2 可以解出 α, β 与 γ, ϕ 的关系:

$$\alpha = \arctan 2(-\sin \gamma \sin \phi, \cos \phi) \quad (2)$$

$$\beta = \arctan 2(-\sin \alpha \cos \gamma, \sin \gamma) \quad (3)$$

进而控制蛇形机器人的二维运动变量 γ, ϕ 。为方便起见, 下面的分析都是直接引用二维运动变量 γ, ϕ 。

2 新型蛇形机器人的运动学分析

蛇形机器人通过相邻关节之间的相对转动产生推力或拉力实现运动。根据其几何特点, 可推出各关节的重心 (x_i, y_i) (本文设定在每个单元的中间位置) 与蛇头 (x_h, y_h) 的位置关系 (见图 4):

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_h + 2lC(\theta_h) + 2l \sum_{k=1}^{i-1} C(\theta_h + \sum_{j=1}^k \phi_j) + \\ &\quad lC(\theta_h + \sum_{k=1}^i \phi_k) \\ y_i &= y_h + 2lS(\theta_h) + 2l \sum_{k=1}^{i-1} S(\theta_h + \sum_{j=1}^k \phi_j) + \\ &\quad lS(\theta_h + \sum_{k=1}^i \phi_k) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $C(\cdot) = \cos(\cdot), S(\cdot) = \sin(\cdot)$; θ_h 为蛇头的绝对转角; $2l$ 为单元长度。

该蛇形机器人采用了万向轮机构, 机构提供的约束 (见图 5) 为

$$\dot{x}_i S(\theta_h + \sum_{k=1}^i \phi_k) - \dot{y}_i C(\theta_h + \sum_{k=1}^i \phi_k) = \dot{y}_i R \quad (5)$$

式中, R 为单元的回转半径 (回转中心到地面的距离)。

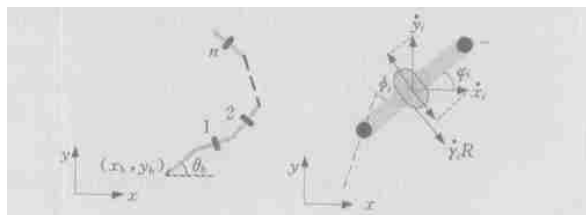


图 4 蛇形机器人模型 图 5 运动学分析

式(4)、式(5) 联立, 得到总的方程为

$$A(q) \dot{\omega} = B(q) \dot{\theta} + R \dot{\gamma} \quad (6)$$

$$A(q) \in \mathbf{R}^{n \times 3} \quad B(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$$

$$\omega = [x_h \ y_h \ \theta_h]^T \in \mathbf{R}^3 \quad q = [\omega^T \ \theta^T]^T \in \mathbf{R}^{n+3}$$

$$\theta = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n]^T \in \mathbf{R}^n$$

$$\gamma = [\gamma_1 \ \gamma_2 \ \dots \ \gamma_n]^T \in \mathbf{R}^{n+3}$$

$$A(q) = \begin{bmatrix} S(\phi_1) - C(\phi_1) & -[2lC(\theta_h - \phi_1) + l] \\ S(\phi_2) - C(\phi_2) & -[2lC(\theta_h - \phi_2) + 2l \sum_{k=1}^l C(\phi_k - \phi_2) + l] \\ \vdots & \vdots \\ S(\phi_n) - C(\phi_n) & -[2lC(\theta_h - \phi_n) + 2l \sum_{k=1}^{n-1} C(\phi_k - \phi_n) + l] \end{bmatrix}$$

$$B(q) =$$

$$\begin{bmatrix} l & & & \\ 2lC_{21} + l & l & & 0 \\ 2l(C_{31} + C_{32}) + l & 2lC_{32} + l & l & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 2l \sum_{i=1}^{n-1} C_{ni} + l & 2l \sum_{i=2}^{n-1} C_{ni} + l & \dots & 2lC_{n(n-1)} + l \end{bmatrix}$$

式中, $\varphi_i = \theta_h + \sum_{k=1}^i \phi_k$; $C_{ij} = \cos(\varphi_i - \varphi_j)$; n 为关节数量。

3 蛇形机器人的控制

蛇形机器人必须能够运动到指定位置或者沿着给定路径前进。分析上述机构组成的蛇形机器人的运动控制, 将式(6) 写成如下形式:

$$A \dot{\omega} = Du \quad (7)$$

其中, $u = [u_1 \quad u_2]^T$, $u_1 = \dot{\theta}$, $u_2 = \dot{y}$, $D = [B \quad RE] \in \mathbf{R}^{n \times 2n}$, E 为单位矩阵, $E \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 。

由式(7) 可得到下面控制蛇形机器人运动的控制规律:

$$u = D^+ A (\dot{\omega}_d - K(\omega - \omega_d)) \quad (8)$$

式中, D^+ 为矩阵的伪逆, $D^+ = D^T(DD^T)^{-1}$; ω_d 为目标位姿; $\dot{\omega}_d$ 为目标速度; K 为比例系数矩阵。

引理 当蛇形机器人的构形组成一条直线或弧形时, 矩阵 $D^+ A$ 将降秩, 机器人将因构形奇异而不能运动^[4]。为此, 必须采用控制策略使蛇形机器人在运动过程中避免奇异构形。

控制器的设计 对于式(7), 矩阵 $D \in \mathbf{R}^{n \times 2n}$ 除了奇异构形外始终是行满秩的, 使系统始终具有冗余自由度, 这样系统始终是可控的。而只有当矩阵 $D \in \mathbf{R}^{n \times 3}$ 中的 $n \geq 3$ 时才可以根据式(7) 解出机器人头部的方向和位置。所以对于式(7), 只要蛇形机器人的单元数量在三个以上, 系统就始终满足冗余可控和可观条件。

当采用上述的控制规律控制机器人运动时, 机器人的运动将由于出现奇异而停止(见图 6)。必须采取适当的控制方案使机器人的运动不收敛于奇异构形。由式(7) 可以得出: 该系统在输入变量 u_1 的基础上又引入输入变量 u_2 , 二者在运动上可以互相补偿或抑制, 即控制蛇形机器人蜿蜒运动的同时, 可以实现利用回转自由度避免奇异和完成回转自由度驱动下机器人的运动。本文称这种运动为复合运动。

定义 为控制蛇形机器人有效运动, 将 $A \in \mathbf{R}^{n \times 3}$ 和 $B \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 矩阵分解成控制蛇形机器人的构形矩阵 $A_s \in \mathbf{R}^{s \times 3}$ 、 $B_s \in \mathbf{R}^{s \times s}$ 来实现避免奇异构形和蛇形机器人的运动矩阵 $A_m \in \mathbf{R}^{m \times 3}$ 、 $B_m \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 来实现运动, 其中 s 表示用来调整构形的

单元数量, m 表示用来实现运动的单元数量。因此, 为使蛇形机器人为可控和可观的系统, 必须满足 $m \geq 3$, 则 $s = n - m$ 。 A_s 、 B_s 用来控制蛇形机器人的构形, 矩阵中的行是从对应的 A 、 B 中提取出来的, 提取后的矩阵用 A_m 、 B_m 表示。例如, 如果构形矩阵为

$$A_s = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1(n-1)} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3(n-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{i(n-1)} \end{bmatrix} \quad a_{ij} \in A, i \in s \quad (9)$$

则运动矩阵为

$$A_m = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2(n-1)} \\ a_{41} & a_{42} & \dots & a_{4(n-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{i(n-1)} \end{bmatrix} \quad a_{ij} \in A, \bar{i} \in \bar{s} \quad (10)$$

$s \subset N, N = \{1, 2, \dots, n\}$

为实现机器人的有效运动, 采用了下面的控制策略:

$$u_1 = B_m^+ A_m (\dot{\omega}_d - K(\omega - \omega_d)) + (I_k - B_m^+ B_m) \varepsilon \eta \quad (11)$$

$$R u_{2s} = A_s \dot{\omega} - B_s u_1 \quad (12)$$

$$R u_{2m} = \xi A (\dot{\omega}_d - K(\omega - \omega_d)) \quad (13)$$

$$u_2 = u_{2s} + u_{2m} \quad (14)$$

$$B_m^+ = B_m^T (B_m B_m^T)^{-1}$$

式中, $I_k - B_m^+ B_m$ 为 B_m 的零空间; I_k 为 k 阶单位矩阵; ε 为比例系数; η 为与系统的奇异性和可操作性有关的系数, $\eta = \partial V / \partial \varphi$; ξ 为回转自由度完成运动的比例系数; V 为能量函数, $V = a \det(A^T A) + b \det(B B^T)$; a 、 b 为比例系数。

即, 由运动矩阵及其零空间推出蛇形机器人运动输入 u_1 ; 构形矩阵与运动矩阵的分离由回转自由度保证(见式(12)); 同时回转自由度也驱动机器人运动(见式(13)); 将避免奇异和运动加到一起完成该蛇形机器人的运动控制(见式(14))。控制结构见图 6, 图中 \dot{V} 为能量函数 V 对关节变量的偏导。

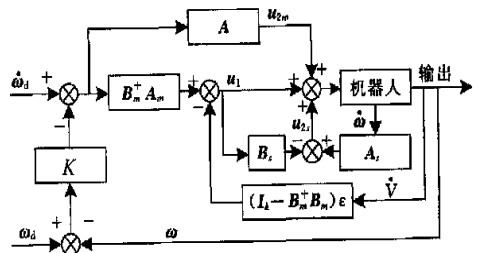


图 6 控制规律图

当然可以根据矩阵 D 的零空间来实现机器

人奇异性的调整及运动控制, 控制方程为

$$u = D^+ A(\dot{\omega}_d - K(\omega - \omega_d)) + (I_{k1} - D^+ D)\varepsilon \eta_1 \quad (15)$$

式中, $I_{k1} - D^+ D$ 为 D 的零空间; $\eta_1 = [\eta^T \ 0_{1 \times n}]^T$ 。

当用该方法控制机器人的运动时发现, 蛇形机器人的某几个单元的蜿蜒运动不明显, 运动主要由回转自由度来完成, 而没有充分利用蛇形机器人的蜿蜒运动。该方法的控制效果相对较差。

4 仿真实验

为验证改进机构运动的灵活性和控制方法在各种情况下的运动效果, 本文进行了仿真实验。仿真环境为: 蛇形机器人由 7 个连杆组成, 其中第一个连杆为蛇头, 为运动灵活没有回转自由度的被动轮。

仿真参数如下: $\omega_d = [0.1t \ 0 \ \pi]^T$, $\dot{\omega}_d = [0.1 \ 0 \ 0]^T$, $K = \text{diag}(1, 1, 1)$, $l = 0.05\text{m}$, $R = 0.1\text{m}$, $a = 1/l^2$, $b = 0.1/l^6$; 初始角度 $\varphi = [\pi/10 \ \pi/11 \ \pi/12 \ \pi/13 \ \pi/14 \ \pi/15]^T$, 初始位置 $\omega_0 = [0 \ 0 \ 2\pi/3]^T$, 并根据相对转角的限制和运动效果在仿真过程中调节 ε 和 ξ 的值。下面分不同情况对各种控制方法进行比较研究:

情况 1 按式 (8) 来控制机器人运动。由图 7 可以发现, 在运动一段时间后机器人达到奇异位形而停止。所以必须使机器人避免奇异, 才能使机器人有效运动。

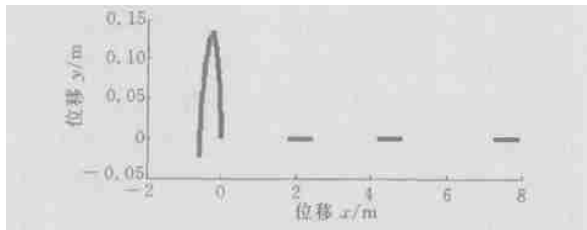


图 7 机器人出现奇异的构形

情况 2 $u_1 = 0, \xi = 1$ 时, 按式 (13) 控制蛇形机器人的运动, 此时, 蛇形机器人依靠回转自由度来运动。由图 8 可以看出, 蛇形机器人始终保持初始构形, 依靠回转自由度实现了机器人身体的

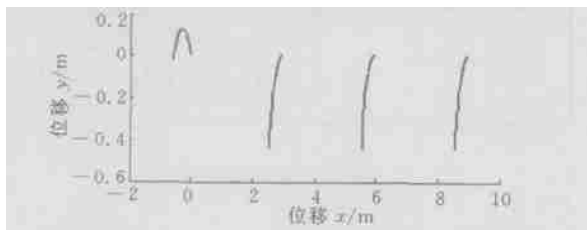
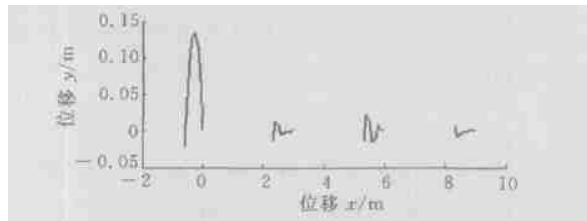


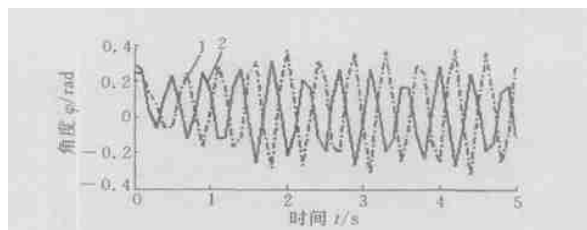
图 8 回转自由度控制蛇形机器人运动构形

转向和平移运动, 所以, 由该机构组成的蛇形机器人可以实现万向运动。

情况 3 在两种输入共同作用下蛇形机器人的运动。按照控制算法图 6 来控制蛇形机器人运动, 蛇形机器人能够有效运动的同时避免奇异构形。因为将最后连杆作为构形矩阵对蛇形机器人的运动没有任何作用, 所以将最后连杆始终为运动矩阵的元素, 并保证所有构形调节都对运动有益。图 9 是控制构形矩阵为 A, B 的 1,3,5 行且 $\varepsilon = 0.05, \xi = 1$ 的仿真结果, 图 10 是控制构形矩阵为 A, B 的 2,4,5 行且 $\varepsilon = 0.1, \xi = 1$ 的仿真结

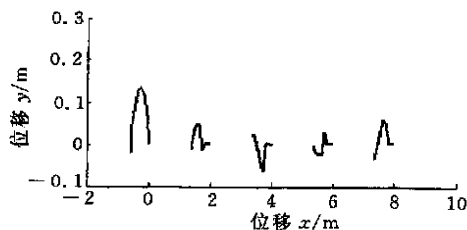


(a) 蛇形机器人运动构形

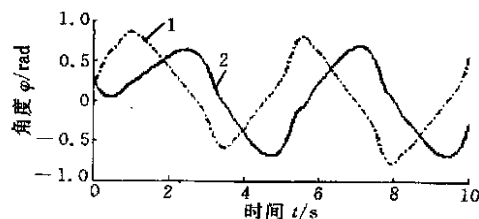


1. 第 2 个关节 2. 第 4 个关节
(b) 蛇形机器人的转角变化

图 9 选择控制构形矩阵 A, B 中 1,3,5 行的蛇形机器人复合运动



(a) 蛇形机器人运动构形



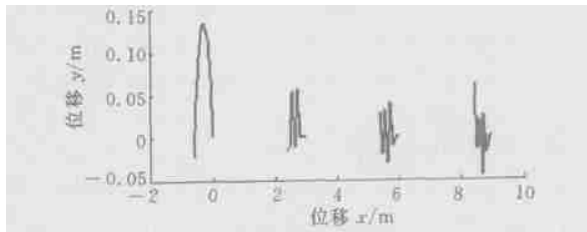
1. 第 2 个关节 2. 第 4 个关节
(b) 蛇形机器人的转角变化

图 10 选择控制构形矩阵 A, B 中的 2,4,5 行的蛇形机器人复合运动

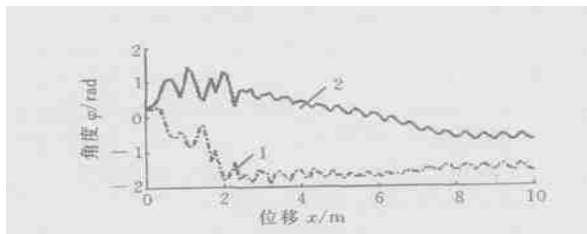
果。比较两图可以发现, 前者的角度变化频率较高, 后者使机器人的角度和运动变化更有规律。

上述分析是通过机器人系统方程中 B 的零空间和用回转自由度的补偿来避免蛇形机器人出现奇异构形, 从而完成机器人的复合运动。

情况 4 如图 11 所示, 蛇形机器人在式(15)控制下通过 D 的零空间实现的运动主要是由回转自由度来完成(见图 11a), 而机器人的摆动关节摆动的角度范围很小(见图 11b), 使得机器人在运动中某些单元的构形基本不变, 即没有摆动现象(见图 11a)。所以, 这种运动没有充分利用机器人的驱动资源。



(a) 蛇形机器人运动构形



1. 第 2 个关节 2. 第 4 个关节

(b) 蛇形机器人的转角变化

图 11 用 D 的零空间来避免奇异

5 分组交替运动

目前, 应用到蛇形机器人上的运动步伐大多是从仿生学的角度提出的。在上述分析中笔者已经用分解矩阵和零空间法实现了蛇形机器人的蜿蜒运动, 但其运动与蛇的运动还有很大区别。由上述仿真可以看出, 当没有构形矩阵去调节蛇形机器人的输入时, 蛇形机器人的运动出现奇异, 这是由于所有的单元都同时为当前的运动服务, 而没有考虑到蛇形机器人能够继续运动的能力, 其结果是出现奇异形状从而导致运动停止。那么可以将每个单元的任务分为两种: 一种是完成当前运动, 另一种是为蛇形机器人的继续运动做准备。在运动过程中两种状态交替出现从而使蛇形机器人产生有规律的运动。为使机器人有效运动, 需将单元的任务与其在运动中的位置和姿态相关联, 使那些当前有利于运动的单元去完成运动任务, 而

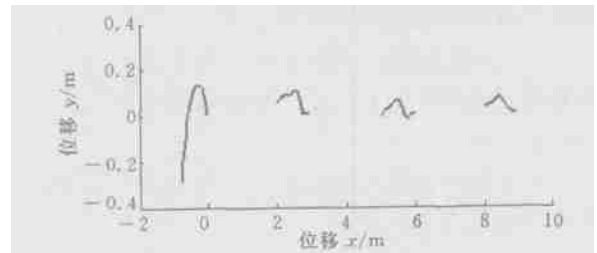
利用对当前任务没有作用或作用很小的单元调整姿态, 为下一步的运动做准备。具体方法如下:

(1) 按一定间隔将蛇形机器人的单元分成单元分组(其前提是必须保证每个分组都能使机器人的运动完全可控和可观)。

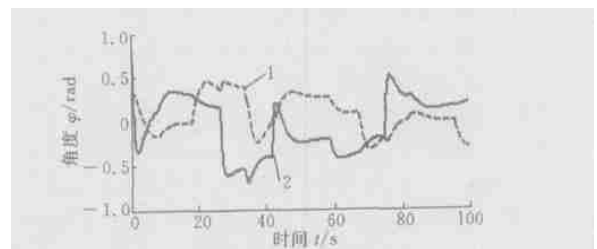
(2) 按照每个单元分组的位形情况推出构形分组(构形矩阵), 该组的单元不去完成运动任务, 而是利用回转自由度实现构形调整。构形分组应能够充分调整蛇形机器人的构形。其他单元分组为运动矩阵, 此时该分组内的回转自由度的输入为零。

(3) 实时检测当前运动矩阵的位形情况, 判断每个单元分组是否对当前运动有利, 如果运动分组中某个单元分组的 $\det(A^T A)$ 值过小, 说明该分组已经对当前的运动不起作用, 应该转为构形分组, 即转到(2)。

将上述方法应用到仿真环境, 为更有说服力, 选择单元数量为 10, $\varphi = [\pi/10 \ \pi/11 \ \pi/12 \ \pi/13 \ \pi/14 \ \pi/15 \ \pi/16 \ \pi/17 \ \pi/18]^T$, 其他参数与上述仿真参数相同。将单元分成三组: 1、4、7号单元为一组, 2、5、8号单元为一组, 3、6、9号单元为一组。每组的 $\det(A^T A)$ 值为运动矩阵和构形矩阵的评定标准。为保证有效调整构形, 令构形分组同时包含两个单元分组, 运动分组中只包含一个单元分组。在仿真中设定当 $\det(A^T A) < 0.001$ 时, 运动矩阵应转为构形矩阵。图 12 为仿



(a) 蛇形机器人运动构形



1. 第 2 个关节 2. 第 4 个关节

(b) 蛇形机器人的转角变化

图 12 分组交替运动的运动仿真

真结果,可以看出采用上述控制方法的蛇形机器人运动非常有规律。值得一提的是:这里的构形矩阵是通过回转自由度来实现的。当然,在三维蛇形机器人的运动中可以利用机器人的俯仰自由度来获得构形矩阵,使机器人实现类似运动。此时,机器人在运动过程中就产生了两侧抬起的运动姿态,类似于蛇的 Sinuslifting 运动。那么,可以这样认为:蛇在快速运动过程中抬起的两边不仅仅是为了增加中间单元与地面的压力,而且由于此部分对运动作用很小,也用它来调整形态。从而从另一个角度进一步解释了 Sinuslifting 运动。笔者称这种运动为蛇形机器人的分组交替运动。与上述方法相比,该运动不用去计算系统中某些矩阵的零空间,大大减少了计算量,有利于蛇形机器人的分布式控制。

6 结论

为实现蛇形机器人的有效运动和能够实际应用,本文提出了一种具有万向轮特点的新机构,该机构具有主动轮和全方位的特点,大大增强了蛇形机器人的驱动能力,可以独立应用回转自由度的主动轮特点来实现运动,也可以与摆动自由度相结合实现复合运动。在考虑非完整约束运动学基础上,提出了控制蛇形机器人的控制规律,并分不同情况对蛇形机器人的运动作了仿真实验。得出如下结论:

(1) 将零空间法和万向机构的特点综合起来,能够实现蛇形机器人的有效运动。

(2) 分组交替运动既能够实现有效运动又有明显的规律性,可以从另一侧面解释蛇的 Sinuslifting 运动。

本文的分析对蛇形机器人的控制和实际应用具有一定意义。

参考文献:

- [1] Hirose S. Biologically Inspired Robots——Snake-like Locomotors and Manipulators. Oxford: Oxford University Press, 1993
- [2] Dowling K. Limbless Locomotion: Learning to Crawl. The 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, 1999
- [3] Klaassen B, Paap K L. GMD-SNAKE2: a Snake-like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control. The 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, 1999
- [4] Prautsch P, Mita T. Control and Analysis of the Gait

of Snake Robots. 1999 IEEE Int. Conf. on Control Applications, Kohala Coast- Island of Hawaii, Havaï I, USA, 1999

- [5] Date H, Hoshi Y, Sampei M. Locomotion Control of a Snake-like Robot Based on Dynamic Manipulability. The 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, 2000
- [6] Matsuno F, Mogi K. Redundancy Controllable System and Control of Snake Robots on Kinematic Model. The 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, 2000
- [7] Matsuno F, Suenaga K. Control of Redundant 3D Snake Robot Based on Kinematic Model. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003
- [8] Yamakita M, Hashimoto M, Yamada T. Control of Locomotion and Head Configuration of 3D Snake Robot (SMA). IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003
- [9] Ma Shugen. Development of a Creeping Snake-robot. Int. Journal of Robotics and Automation, 2002, 17(4): 146~153
- [10] Ma Shugen. Analysis of Snake Movement Forms for Realization of Snake-like Robots. The 1999 IEEE International Conference of Robotics and Automation, Detroit, Michigan, 1999
- [11] Ma Shugen. Analysis of Creeping Locomotion of a Snake-like Robot. Advanced Robotics, 2001, 15(2): 205~224
- [12] Ma Shugen, Tadokoro N, Bin L, et al. Analysis of Creeping Locomotion of a Snake Robot on a Slope. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003
- [13] Ma Shugen, Ohmameda Y, Inoue K, et al. Control of a 3-dimensional Snake-like Robot. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003

(编辑 苏卫国)

作者简介:叶长龙,男,1974年生。中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室、中国科学院研究生院博士研究生,沈阳工业大学机械工程学院讲师。研究方向为仿生机器人和机器人机构。发表论文10余篇。马书根,男,1963年生。中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室研究员、博士研究生导师,日本国立茨城大学工学部系统工程系教授、博士研究生导师。李斌,男,1963年生。中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室研究员。王越超,男,1960年生。中国科学院沈阳自动化研究所所长、研究员、博士研究生导师。