

基于万向节结构的蛇形机器人攀爬运动机理研究

王超¹, 邓宏彬¹, 李东光¹, 王青云¹, 庞博²

(北京理工大学机电学院, 北京 100081; 河北工程大学, 邯郸 056038)

摘要:基于万向节结构的攀爬蛇形机器人, 各单元模块采用万向节连接, 大大提升了蛇形机器人的空间灵活性、动作复杂性和运动模式多样性。本文在分析了蛇形机器人攀爬行为的平衡原理后, 使攀爬蛇形机器人模仿生物蛇的攀爬方式, 沿等距螺旋线方向, 采用尺蠖般的蠕动步态, 从而得到蛇形机器人相关控制参数的函数关系, 并绘制出关系曲线。

关键词: 蛇形机器人; 万向节结构; 攀爬运动; 蠕动步态

0 引言

蛇形机器人可以实现蜿蜒运动、翻滚运动、行波运动、攀爬运动、直线运动等多种运动形式, 是一种超冗余度机器人。运动稳定、运动的形式多变、地面适应性良好等优点, 使得它在许多领域都具有广泛的应用前景^[1]。从 1972 年 Tokyo Tech 的 Shigeo Hirose 研制出第一台蛇形机器人 ACM III^{[1][2]}至今, 相继有数十台蛇形机器人样机问世。这些样机可实现蜿蜒爬行、侧滑、避障、翻滚等二维平面运动, 大部分已经具备爬台阶、抬头等在三维空间中运动的能力^[2]。近几年研制的一些蛇形机器人样机, 更有针对性和多样性。如 UMich 研制的 OmniTread^[3]和 CMU 研制的 M 系列蛇形机器人^{[4][5]}, 甚至能垂直攀爬数米之高。

目前, 攀爬行为分为两种: 内攀爬和外攀爬。内攀爬在攀爬对象内部进行, 如两面墙之间、管道内部。OmniTread 和 M1、M2 等即已实现了内攀爬。外攀爬是沿攀爬对象外壁进行。M3^[5]在采用正交结构的基础上, 安装了强劲的动力系统, 可以呈螺旋状缠绕在竖直或水平管道外部, 并以翻滚的运动方式向上攀爬。这种翻滚步态, 同一时刻参与运动的部分较多, 攀爬对象的形状受到诸多限制, 环境应变较困难。于是, 上海交通大学机器人研究所孙洪等人提出一种新型的外攀爬蛇形机器人 CSR。CSR 采用具有万向节功能的 P-R (pitch-roll) 结构, 结合蛇的蠕动运动实现外攀爬。但相对较大的 CSR 模块单元长度妨碍其灵活性, 此时 P-R 结构将不再具有优势。

为了研制出像生物蛇一样具备蠕动攀爬功能的蛇形机器人, 本文针对外攀爬这一问题进行初步探讨。以万向节结构为基础, 设计蛇形机器人的结构和外形, 保证其灵活的三维运动能力。本文同时分析了蛇形机器人攀爬行为的平衡原理。最后得到蛇形机器人相关控制参数的函数关系, 绘制出蠕动步态下的运动轨迹, 这些都为今后攀爬蛇形机器人样机的研制提供理论支持。

1. 蛇形机器人的执行单元

蛇形机器人由多个相同或相似的单元模块连接在一起, 无固定基座, 是一种多关节、多自由度的链式柔性机器人。要实现蛇形机器人自由攀爬, 应保证其执行单元具备完整的三维工作空间, 选取合理的单元模块间连接方式。目前, 蛇形机器人有三种单元模块间连接方式: 平行连接、正交连接、万向节连接。

1.1. 现有常见关节连接方式

(1) 平行连接: 蛇形机器人的各单元模块以转动副相连, 各个转动副的轴线均垂直于蛇体轴线且互相平行^[7,8]。如 Tokyo Tech 的 Shigeo Hirose 研制的 ACM III, 美国的 Gavin Miller^{[6][7]}研制的 S 系列蛇形机器人, 上海交大黄恒等人研制的微小型仿蛇机器人等。

(2) 正交连接: 组成机器人的单元模块间仍然以转动副连接, 只是相邻转动副的轴线互相垂直, 且均垂直于蛇体纵轴。如 Makoto Mori 等人研制的 ACM-R3 即采用此种连接方式^[8], Ismet Erkmén 等人研制的 Rescue Snakebot^[9]和上海交大机器人所研制的蛇形机器人样机也均可手动重构为正交连接。

(3) 万向节连接: 蛇形机器人的相邻关节用球形万向节连接, 每个单体可绕相邻单体做 360° 的球面旋转。如德国的 Ralf Linnemann 等人研制的 GMD-Snake2, Takeshi AOKI 等人研制的 SSR-II, NEC 公司

的 Takanash 等人研制的 Orochi 等蛇形机器人。

三种连接方式中，万向节连接是最具灵活性的连接方式，其工作空间是一个球面，亦即是完整的三维空间，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最为理想[9,10]。

1.2. 执行单元设计

仿照生物蛇的结构特点和运动机理，蛇形机器人的机械结构由多个相同的模块串联构成，每个模块都具有独立的驱动和控制系统，可以产生有限范围内的相对运动。通过控制各模块的运动时序，相互协调，蛇形机器人可以实现多种运动模式。

本文设计的是一种十字型万向节模块，如图 1。十字型万向节具有结构简单，传动效率高的优点，它由两个独立的、轴线正交的执行机构形成一个双自由度万向节，用于模拟蛇的柔韧躯体。多个十字型万向节模块相连构成了一个高冗余度的蛇形机器人，理论上具有向任何方向弯曲的能力。另外，每个模块均有两个永磁直流电机，每个电机控制一个方向的转动，具有单独的控制程序。电机输出的力矩通过锥齿轮与直齿轮配合的减速齿轮系传递到中部的万向节。这样，只要合理控制每一个永磁直流电机的转动速度和时序，就能协调合理控制每个模块的运动，继而实现蛇形机器人的各种运动模式。

此模块是蛇形机器人最小的结构执行单元体。由于蛇形机器人需要在三维空间中运动，攀爬过程中周身均有可能与环境表面接触，所以为保证接触点的均匀有效，采用管套式结构设计。伺服电机安装在套筒之中。套筒与套筒之间通过连接件相连。

两个单节和一个万向节定义为一个关节。每个关节中，靠近蛇头的单节定义为 A 单节，靠近蛇尾的单节定义为 B 单节。两关节间相邻的单节靠螺钉固连，且这两个单节的驱动电机转轴位于同一轴线上。

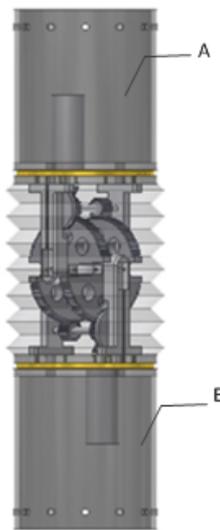


Figure.1 执行单元的结构

2. 蛇形机器人运动机理分析

2.1. 蛇形机器人的攀爬模式

通过对蛇爬树这个行为的观察研究可以发现：蛇利用各节之间的相对运动产生蠕动来实现缠绕攀爬，采用直线式移动；生物蛇的这种爬树方式是经过千万年的演化而保留下来的，说明该方式是比较合理的。

本文中蛇形机器人正是模仿生物蛇的爬树模式，采用尺蠖蠕动方式实现攀爬运动。

2.2. 攀爬的静态平衡机理

对于基于十字型万向节模块的蛇形机器人攀爬行为的研究，攀爬行为设计如下：蛇形机器人以等距螺旋状为初始姿态，缠绕在半径和表面粗糙度均为常数的杆上，采用尺蠖般的蠕动步态，在第一个运动波产

生移动步距，然后通过部分关节的依次起伏向上传递运动波，其他部分则缠绕在杆上，产生摩擦力以抵消整体所受重力。一个运动波由尾至首传递完成后，蛇形机器人向上到达一个新位置，其攀爬轨迹始终是一条等距螺旋曲线。设定以下结构参数：

(1) 蛇形机器人本体：单节长为 l ，关节质量为 m ，关节电机转矩 T ， α 为 A 单节相对万向节所转过的角度， β 为 B 单节相对万向节所转过的角度， α 与 β 的取值范围均受关节结构设计的影响。关节转角的正负由右手螺旋法则判断，以关节轴线向上方向为拇指所指方向，即正向。

(2) 杆：半径为 r 的圆柱体，与蛇形机器人之间摩擦系数为 μ 。

蛇形机器人在各关节转过相应 α 、 β 角度后，以 θ 为倾角呈等距螺旋状静止缠绕在杆上。其关节在中点处与螺旋曲线相切，即附着于圆柱体表面，由于连杆模型并不是平滑的柔性曲线，所以，万向节所在各点皆不与圆柱体接触，处于悬空状态。

对于包括有两个万向节的 ABCD 连杆部分，连杆上各关节电机力矩作用在杆与连杆的相切点处，如图 2 所示：在切点 M_{AB} 处，有 B 处关节电机产生的垂直于该电机轴 b 及 BM_{AB} 杆的力 F_{AB} 切点 M_{BC} ，有 B 处关节电机产生的垂直于该电机轴 b 及 BM_{BC} 的力 F_{BC} 。成 α 角的驱动电机仅负责蛇形机器人螺旋形状的形成，对切点摩擦力不做贡献。

以 AB 关节中心点 M_{AB} 为例，在 M_{AB} 点处建立坐标系，以 M_{AB} 为坐标原点，X 轴过 M_{AB} 与以 O 为圆心的切面圆相切，以杆轴为轴线，满足右手螺旋定则时的四指指向为 X 轴正向，与杆轴平行向上为 Z 轴正向，Y 轴指向由右手螺旋定则确定。

设 B 点 P 关节对杆有作用力产生，则将 F_{BA} 在 M_{AB} 点沿坐标系 M_{AB} 的各轴进行分解，则其方向指向圆心 O （即沿 X 轴负方向）的分量大小为 $\frac{T}{r} \cos\alpha$ ，正是这个分量产生了摩擦力。另外，沿 X 轴正方向和沿 Z 轴负方向的分量由于位于切平面内，使得连杆系统能产生相应的运动趋势。

同理，该关节电机在 M_{BC} 点的 F_{BC} 也会产生沿该处切点坐标系 Y 轴负方向大小为 $\frac{T}{r} \cos\alpha$ 、沿 X 轴负方向和沿 Z 轴正方向的三个分量。

也就是说，每个关节中产生 β 角的电机会在连接其上的两个连杆与杆的切点处分别产生一个沿该处切点坐标系 Y 轴方向大小为 $\frac{T}{r} \cos\alpha$ 的力，以及沿 X 轴方向和沿 Z 轴方向的另外两个分量。

蛇形机器人在树干上至少需缠绕半周，形成以杆纵轴为中心的对称夹持状态，即缠绕后至少有两个万向节关于杆中轴线对称，这样才有可能保证其不下滑[7]。

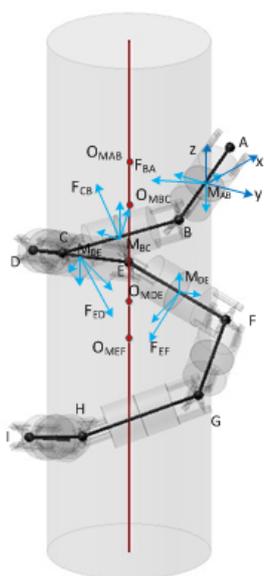


Figure. 2 仿生蛇简化为空间连杆模型

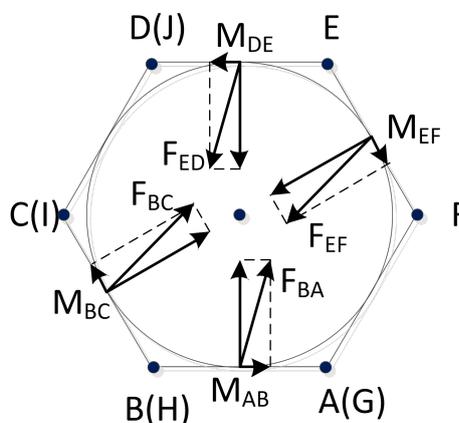


Figure. 3 连杆系统俯视图

如图 3 所示, 当连杆系统绕杆刚好为整周, 则系统中每一个关节产生的作用力都是有效力, 此时电机力矩的利用率最高。假设关节两端所对应的螺旋角是 γ , 则能够绕杆整周的关节数为

$$N \quad (1)$$

对于任意的关节数 n , 其所对应的总螺旋角为 $n\gamma$, 在杆上缠绕的螺旋的整周数

$$K = \text{floor} \quad (2)$$

式中, floor 表示朝负无穷方向靠近最近的整数, 此时有 $n_1 = K$ 个万向节产生有效摩擦力。在杆上缠

绕 K 周后的剩余关节为 n_{rest} , 若 N 为偶数且 n_{rest} 在杆上缠绕超过半周, 关于杆中轴线 180° 对称的关节增多, 则产生有效反作用力的电机增多, 产生的摩擦力就多。其中互相对称部分的万向节产生的反作用力会产生有效的向上摩擦力, 有效万向节的个数为 n_2 。

$$n_{rest} = n \quad (3)$$

$$n_2 = n_{rest} \quad (4)$$

整个蛇体对杆施加的正压力为

$$F_n = (n_1 + n_2) \cdot (2 \frac{r}{l} \cos \theta) \quad (5)$$

即蛇体受到杆的反作用力为

$$F_n' = (n_1 + n_2) \cdot (2 \frac{r}{l} \cos \theta) \quad (6)$$

若要蛇体静平衡, 需满足

$$\mu F_n' - nmg \quad (7)$$

将公式 (5)、(6) 代入 (7), 得到:

$$\sqrt{2} \mu T \cdot \left(1 - \frac{\pi}{2n \cdot \arctan(\frac{l \cos \theta}{r})} \right) = \quad (8)$$

蛇形机器人在杆上的蠕动需要悬空部分关节实现步态的传递。若有部分关节悬空, 相当于增大关节质量和减少缠绕的节数。设悬空部分关节数为 x , 则剩下 $n-x$ 关节真正发挥缠绕作用。令

$$n' = n - x \quad (9)$$

把 x 节的重量平均分配到 $n-x$ 中, 令

$$m' = \quad (10)$$

得到

$$\sqrt{2\mu T} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{2n \cdot \arctan\left(\frac{l \cos \theta}{r}\right)} \right) = m \quad (11)$$

$$X = n - \frac{\pi}{2 \arctan\left(\frac{l \cos \theta}{r}\right)} \quad (12)$$

3.2.1 蠕动步态规划

蛇形机器人静止缠绕在杆上的状态只是其攀爬的基本状态，要实现向上攀爬，就需蛇形机器人的部分关节运动起来。

蛇形机器人在杆上缠绕攀爬时其运动波形可以由三根以上的多连杆组成，采用蠕动步态时需要考虑运动的平稳性及重力的作用。如果抬起连杆过多，将增加与圆柱面接触部分的重力作用，增大各电机的载荷，对摩擦力要求较高。故本文将采用三个连杆形成的蠕动步态。

蛇形机器人在杆上采用三连杆蠕动步态攀爬，其运动波的传递方式与在平面中的类似，只是形成运动波形的三个连杆不在同一平面内，各连杆之间的夹角是空间角。蛇形机器人的空间三连杆运动波的传递，会产生最多 6 单节同时离开杆。

运动仍从蛇形机器人的尾部开始向头部传递，从初始状态开始，三连杆运动波依次从 J 点传递到 A 点，到结束状态，连杆系统到达一个新的位置，这一状态仍为倾角等于 θ 的等距螺旋。

对于一个有九个连杆组成的系统，三连杆运动波要经过十三步才能完成一个步长的运动。

第一步，I 关节和 H 关节开始运动，产生此轮波形传递的步长 L_s 。

第二步，G 关节加入运动，开始将运动向上传递。

第三步，第一个中间状态，J、I 到达新目标位置。

第四步，F 关节加入运动，开始三连杆运动波的传递过程。

第五步，第二个中间状态，H 关节到达新目标位置。

第六、七步，到达第三个中间状态，G 关节到达新目标位置。

第八、九步，到达第四个中间状态，F 关节到达新目标位置。

第十、十一步，到达第五个中间状态，E 关节到达新目标位置。

第十二步，D、C、B 三个关节进行末端运动波传递。

第十三步，运动波传递完成，A 到达位置 A'。

最后蛇形机器人恢复倾角为 θ 的等距螺旋状态。除首、尾杆外，其他波形传递所经过处任意三个连杆的运动机理都相同。

运动波传递产生的步长在第一步就已确定。在一个运动周期内，整个系统位移 L_s 相当于从初始状态尾杆中点 S 到结束状态尾杆中点 S' 的位移；其它后续步骤只是波形的依次传递，对步长不再有影响。因此决定步长的只有 I 关节处的角位移 β_I 。

空间三连杆运动波的传递，一个波形最多同时涉及四个万向节的转动，设这四个万向节角位移分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 。运动波的传递过程即是四个角位移依次在各万向节间传递的过程。四个角位移的依次传递需要合理控制各万向节的电机转动，而其中的控制参数需要各空间角之间的关系来确定。这样，首先要得到这些空间角在某一个投影面上的投影之间的关系，再通过空间角与其投影之间的关系换算即可。首先需确定一个投影面，在这投影面上，各角度之间关系符合平面中的运动规律，然后再分析各空间角与其投影角之间的关系，最终得到各空间角位移之间的函数关系。

在整个波形的传递过程中，除 JI、BA 杆外，其它任意三个连杆的运动机理都相同，因此我们以 IH、HG 和 GF 为例进行分析，其结果对于任意三连杆都适用。选择以过 I、F 和 HG 的中点三点的平面为投影面，在投影面内作 HG 的投影 H'G'，得到空间四边形 IHGF 的投影 IH'G'F，将 IH'G'F 看作是一个四连杆机构，如图 4 所示。

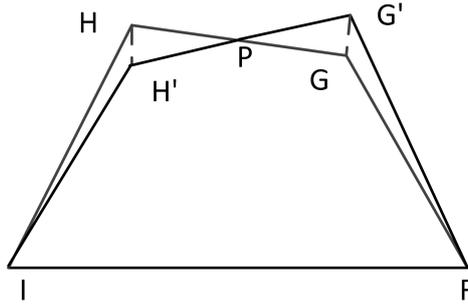


Figure.4 空间四边形的投影面

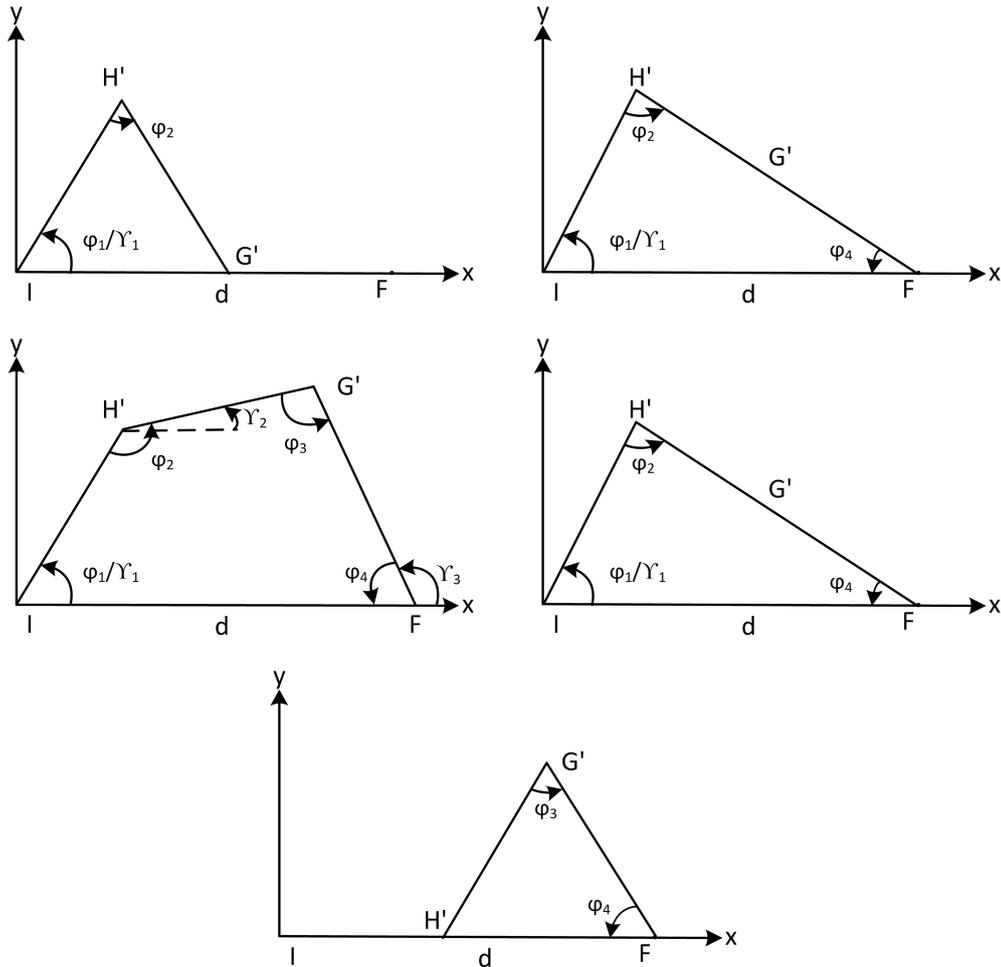


Figure.5 φ_i 与 γ_i 图示

图 5 中 γ 表示组成运动波形的连杆与水平地面或 x 轴的夹角, φ 表示相邻连杆之间的夹角, 规定顺时针为负, 逆时针为正。

连杆运动初始时刻 φ_1 等于 γ_0 , φ_4 等于 0, 波形传递过程中, 先由主动角 φ_4 从 0 增大到 $\arccos \frac{d^2}{4l^2}$, 再

让 φ_1 为主动角, 从当前位置减小到 0。此时, φ_1 等于 0, φ_4 等于 γ_0 , 至此, 此连杆系统完成波形的传递。

假如已知连杆 IH'相对连杆 IF 的转角 φ_1 , 那么运动波形上各连杆间的相对转角可用 φ_1 来表示。

$$|IF| = d = 2l + 4lc \tag{13}$$

$\gamma_2 =$

$$2\arctan \frac{-8l^2 \sin \gamma_1 \pm \sqrt{(8l^2 \cos \gamma_1 - 4)(8l^2 \sin \gamma_1 + (4l^2 + d^2)4ld \cos \gamma_1)}}{4l^2 + d^2 - 4ld \cos \gamma_1 - 8l^2 \cos \gamma_1 + 4ld} \quad (14)$$

$$\tan \gamma_3 = \frac{l \sin \gamma_1 + ls}{l \cos \gamma_1 + lco} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = \gamma_1 \\ \varphi_2 = \pi - \gamma_1 \\ \varphi_3 = \gamma_3 \\ \varphi_4 = \pi - \end{cases} \quad (16)$$

其中， γ_2 中士号由连杆系统运动过程中的实际位置决定。

由式 (16) 可得运动波形上各连杆间夹角角速度间的相对关系

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \dot{\gamma}_1 \\ \dot{\varphi}_2 = \dot{\gamma}_2 \\ \dot{\varphi}_3 = \dot{\gamma}_3 \\ \dot{\varphi}_4 = - \end{cases} \quad (17)$$

$$\omega'_{1re1} = \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_1} \quad (18)$$

$$\omega'_{2re1} = \frac{\dot{\varphi}_2}{\dot{\varphi}_1} = \frac{\sin(\gamma_1 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_3 - \gamma_2)} \quad (19)$$

$$\omega'_{3re1} = \frac{\dot{\varphi}_3}{\dot{\varphi}_1} = \frac{\sin(\gamma_2 - \gamma_1) + \sin(\gamma)}{\sin(\gamma_2 - \gamma_3)} \quad (20)$$

$$\omega'_{4re1} = \frac{\dot{\varphi}_4}{\dot{\varphi}_1} = -\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\gamma)} \quad (21)$$

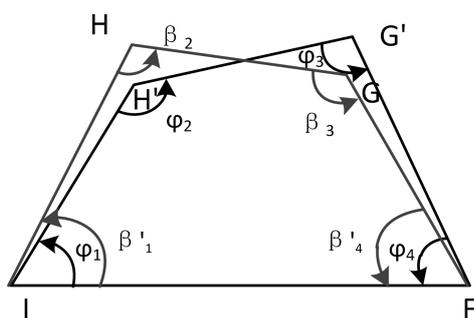


Figure.6 φ_i 与 β_i 图示

图 6 中，空间四连杆机构中各连杆之间夹角与其投影的关系为：

$$\cos \beta'_1 = \frac{\sqrt{14}}{4} c_1 \quad (22)$$

$$\cos \beta_2 = \frac{1}{4} + \frac{\sqrt{7}}{4} c_1 \quad (23)$$

$$\cos \beta_3 = \frac{1}{4} + \frac{\sqrt{7}}{4} a_1 \quad (24)$$

$$\cos \beta_4 = \frac{\sqrt{14}}{4} a_1 \quad (25)$$

连杆的实际转角与四连杆机构中相应角之间的关系为：

β_I 与 $\beta_{I'}$ 之间的关系

如图 7，在 O_J 、 $O_{J'}$ 、 I' 点建立坐标系。

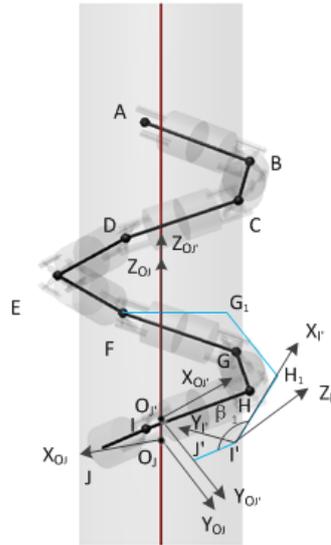


Figure.7 求解 β_I 与 $\beta_{I'}$ 关系时各坐标系

点 H_1 在坐标系 $\{O_J\}$ 中的坐标 H_1 ，可通过其在坐标系 $\{O_{J'}\}$ 中的坐标 ${}^{I'}H_1$ 经过坐标变换得到

$$F = {}_{O_{J'}}^{O_J} T {}_{I'}^{O_{J'}} \quad (26)$$

其中

$${}_{I'}^{O_{J'}} T = \text{Trans}({}^{O_{J'}}x_{I'}, {}^{O_{J'}}y_{I'}, {}^{O_{J'}}z_{I'}) \text{Rot}(z, \frac{\pi}{2})$$

$$\text{Rot}(y, -\theta) \text{Rot}(x, \frac{\pi}{4}) \text{Rot}(z, \pi - \psi) \quad (27)$$

$$\psi = \arccos \dots \quad (28)$$

$${}_{O'}^{O_I}T = \text{Trans}(0,0,z_{j'})\text{Rot}(z,\psi) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{j'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$${}^{I'}H_1 = \quad (30)$$

而且,

$$x_F = r' c \quad (31)$$

$$y_F = r' s \quad (32)$$

$$z_F = r' l \quad (33)$$

$$|H_1 F| =$$

$$\sqrt{(x_{H_1} - x_F)^2 + (y_{H_1} - y_F)^2 + (z_{H_1} - z_F)^2} \quad (34)$$

$$|I' F| = d =$$

$$\sqrt{(x_{I'} - x_F)^2 + (y_{I'} - y_F)^2 + (z_{I'} - z_F)^2} \quad (35)$$

$$\cos\beta'_1 = \frac{|H_1 F|^2 - d^2}{2d} \quad (36)$$

$$\beta_1 = f_{\beta'_1} \quad (37)$$

β_4 与 β'_4 之间的关系

如图 8, 在 O_I 、F 点建立坐标系。

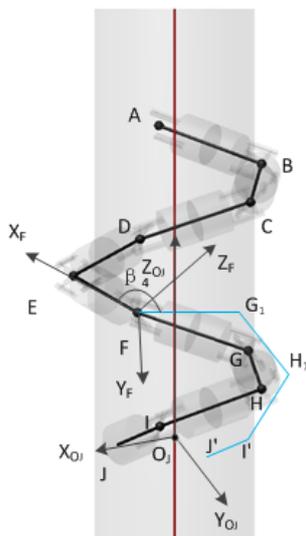


Figure.8 求解 与 关系时各坐标系

$$G_1 = {}^O_{F1} \tag{38}$$

$${}^O_{F1}T = Trans(x_F, y_F, z_F)Rot\left(z, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$Rot(y, -\theta)Rot\left(x, \frac{\pi}{4}\right)Rot(z, \dots) \tag{39}$$

$${}^F G_1 = \begin{bmatrix} 2lco \\ 2lsi \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{40}$$

又

$$x_{I'} = r' \cos \frac{\varphi}{2} \cos \psi - r' \sin \frac{\varphi}{2} \tag{41}$$

$$y_{I'} = r' \cos \frac{\varphi}{2} \sin \psi + r' \sin \frac{\varphi}{2} \tag{42}$$

$$z_{I'} = l \sin \theta \tag{43}$$

$$|I'G_1| = \sqrt{(x_{I'} - x_{G_1})^2 + (y_{I'} - y_{G_1})^2 + (z_{I'} - z_{G_1})^2} \tag{44}$$

$$\cos \beta'_1 = \frac{|I'G_1|^2 - \dots}{2d} \tag{45}$$

$$\beta_1 = f_{\beta'_1} \tag{46}$$

连杆的实际转角与空间四连杆机构中各连杆投影的关系为

$$\begin{cases} \beta_1 = f_1 \\ \beta_2 = f_2 \\ \beta_3 = f_3 \\ \beta_4 = f_4 \end{cases} \tag{47}$$

一个运动波形的传递过程中，四个万向节的空间角对应的四个平面角的变化曲线如图 9 所示。

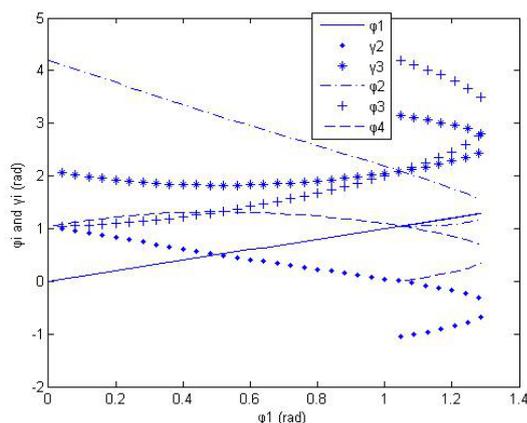


Figure.9 各平面角之间的关系

4. 结论

本文针对基于万向节结构的攀爬蛇形机器人缠绕爬杆动作进行了研究，分析了蛇形机器人攀爬行为的平衡原理；机器人模仿生物蛇尺蠖般的蠕动步态实现攀爬。最后得到了蛇形机器人相关控制参数的函数关系，并绘制出了关系曲线，为攀爬蛇形机器人样机的制作和攀爬对象的选择提供了理论依据。

采用万向节连接方式的攀爬蛇形机器人的执行单元具有完整的三维工作空间，因此能够实现更为灵活多变的三维运动。攀爬过程中，各关节仅有一个电机为步态传递提供驱动，大大减小了万向节结构蛇形机器人的控制难度，但是此控制方式不能很好地适应攀爬对象形状的多变性。下一步将针对各关节内两电机耦合驱动时的运动机理进行研究。

参考文献:

- [1] Endo G, Togawa K, Hirose S. Study on Self-contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1999:1399-1405.
- [2] Yamada H, Hirose S, Study on the 3D shape of active cord mechanism. Proceeding of the IEEE International Conference on robotics and Automation. Orlando,USA, 2006:2890-2895.
- [3] Granosik G, Hansen G, Borenstein J. The omnitread serpentine robot for industrial inspection and surveillance. Industrial Robots, 2005,32(2):139-148.
- [4] Borer K, Gianfortoni P, Lipkin K, et al. Modular serpentine robots [EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/~biorobotics/projects/modsnake/modsnake.html>, 2006.
- [5] Greenfield A, Rizzi A, Choset H. Dynamic ambiguities in frictional rigid-body systems with application to climbing via bracing. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA, 2005:1947 -1952.
- [6] Hong S, Peisun M, et al. Inchworm Locomotion Gait for Snakelike Robot. *Journal of Southeast University*, 2007, 4(23):556-560.
- [7] Kulali G.M, Gevher M, et al. Intelligent Gait Synthesizer for Serpentine Robots. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington,2002,2:1513-1518.
- [8] Wu XD, Ma SG. Adaptive Creeping Locomotion of a CPG-controlled Snake-like Robot to Environment Change. *Journal of Autonomous Robots*, 2010,28(3):283-294.
- [9] Mori M, Hirose S. Three-dimensional Serpentine Motion and Lateral Rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo,Japan,2002,1:829-834.
- [10] Li N, Zhao TS, Zhao YZ. Design and Realization of a Snake-like Robot System Based on a Spatial Linkage Mechanism. *Journal of Robotica*,2009,27:779-788.
- [11] Y CL, Ma SG, Li B, et al. Modular Universal Unit for a Snake-like Robot and Reconfigurable Robots. *Journal of Advanced*

Robotics,2009,23(7-8):865-887.

[12] Ma SG, Ye CL, Li B. Reconfigurable Modular Universal Unit (MUU) for Mobile Robots. 9th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, Tsukuba, Japan, 2009:453-461

[13] Zuo ZJ, Wang ZF, Li B. Serpentine Locomotion of a Snake-like Robot in Water Environment. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetic, Bangkok, Thailand, 2009, 1-4:25-30.

[14] Bezgovsek J, Grabec I, Muzic P. Development of a Snake-like Robot. *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 2(54):148-153.

[15] Skonieczny K, D'Eleuterio GMT. Modeling Friction for a Snake-like Robot. *Journal of Advanced Robotics*, 2008, 5(22):573-585.