
第二十二届“冯如杯” 学生创意大赛项目论文

“半软式”多足机器人

二〇一二年四月

摘要

随着科技的不断进步，机器人技术也在不断提高，适用的范围也在不断扩展。尤其是在探险、救灾等会对人的安全健康构成威胁的任务中，机器人更是广泛受到欢迎。本文阐述了一种新型半软式机器人的设计原理、运动分析以及应用范围。本文所讨论的机器人，采取仿生的思路，模仿蜈蚣、马陆等多足类爬虫类生物，利用金属线控制机器人身体，脊柱截面状骨架支撑，以机械足作为动力，能够以灵活方式前进。此机器人可以克服现有机器人灵活度不高、体型过大、地形适应能力不足的缺点，可以在狭小空间自由穿行，跨越障碍和沟壑，并且且能提供实时信息甚至给受困人员提供帮助。

关键词：仿生；线控制；多足；机器人；

Abstract

As science and technology are developing quickly, technics in robots are also improving, which makes application of robots in a wider field. Robots received a welcome in tasks that pose threats to humans health or lives, especially in exploration and providing disaster relief. The structure, locomotion analysis and fields of application of the soft structure and multilegged robot are introduced. Bionic methods are used in imitating scolopendra and millipede. Robot of this kind is controlled with metal wire, body supported by metal slice of skeleton and mechanical legs as power. It can overcome present robots' drawbacks, involving being not flexible, too large in size, incapable of adapting to different working environments, and move in narrow and uneven area without limits. It can cross obstacles and gaps, provide information and even give help to people in need.

Keywords: bionics; metal-wire-controlled; ultilegged; robot;
half-soft-structured;

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 目前研究成果分析.....	1
第二章 总体设计.....	3
2.1 机器人躯干.....	3
2.2 腿部设计.....	4
2.3 总体构型.....	5
第三章 运动分析.....	7
3.1 直线行走.....	7
3.1.1 平坦路面直线前进.....	7
3.1.2 崎岖路面直行.....	7
3.2 曲线行走.....	7
3.2.1 平面转弯.....	8
3.2.2 空间转弯.....	8
3.3 翻越障碍.....	8
3.4 跨越沟壑.....	9
3.5 钻洞.....	10
第四章 设计缺陷.....	12
第五章 应用前景.....	13
第六章 参考文献.....	14

第一章 绪论

1.1 研究背景

近些年,各种严重的自然灾害频发,给我们的生活带来了很大的损失。因而,对救援工作的要求也不断提高,越来越需要能进入一些狭小、不规则空间活动的机器人作为辅助救援的工具。而在目前的机器人中,仿生机器人的环境适应能力较为突出。因而寻找一种能够在狭小、不规则空间自由行进,并能提供给人们帮助的仿生机器人就显得十分迫切。

目前的仿生机器人种类繁多,形态各异。除了飞行类机器人外,地面上行进的主要是多足式和无足式两种。多足式的除了仿人的双足机器人,最多的是四足、六足和八足机器人。这些机器人主要模仿的是蚂蚁、蜘蛛等行动的方式。如早期美国研制的四足车“Walking Truck”和印度的六足行走式机器人“舞王”。而无足式的仿生方法也有很多,主要模仿的是蛇类或蚯蚓等前进方式,如法国科学家所研制的用于医疗检测的单段连续型机构“Clobot”等。然而多足机器人和无足式相比,无足式机器人更柔软,对狭小空间的适应能力更强,但多足式对崎岖路面等环境的应对能力更强,且前进时可产生的动力更大。因而如果将这两种形式的机器人结合起来,做成一种“半软式”的多足机器人,那么这样的机器人就会有更强的适应能力和更广泛的用途。

这种“半软式”多足机器人除了能在抗震救灾等方面有所发挥,还能在如探险、科学考察、考古等方面做出贡献。例如 2002 年对埃及胡夫金字塔王后寝室南通道进行探秘的过程中,美国科学家就使用了机器人穿过通道进行探测考察。当时使用的是一种履带式长形机器人,这种机器人在平直空间运动很方便,因此应对笔直的通道是不费力的。然而如果通道是蜿蜒曲折的,那么这种机器人则会完全排不上用场。但如果是仿生类的“半软式”机器人,则可以利用柔软的身躯顺利地通过。

而在实际的环境里,寻找一条笔直的通道时常是不现实的。如洞穴、岩石缝隙等具有崎岖路面、狭窄空间的环境,是科学家经常要面对的现实。如果可以利用半软式机器人,那么科学家的工作会更加轻松。

1.2 目前研究成果分析

在参考对比文献后可知,目前多足机器人的身体部分有两种:1、固定形状的一单元结构,如蜘蛛型机器人等。2、多单元串联,单元与单元之间用关节连接,例如机器蜈蚣(图 1-1)。然而这些多足类机器人有一个缺点,就是柔韧性不够好,即使是多单元串联式的机器人,也因为关节处安装了转轴而不能完全做到身体任意方向扭曲,只能是在平面内做摆动。这就限制了机器人在狭小且扭曲的空间内运动。有的人会提出将机器人小型化,但这样会有两个缺点:1、机器人负载能力下降,导致功



图 1-1

能受到限制。2、机器人小型化则意味着机械部件的小型化，而这却需要更高的科技支持，并且成本也会上升。

而无足机器人主要也有两种，1、也是刚性单元串联式。2、没有刚性关节和连杆，也称连续型机器人。无足机器人的不足之处在于虽然躯体柔软，适应各种形状的狭小空间，但由于只能通过扭曲身体前进，因而在动力方面与多足机器人相比处于劣势。所以负载有限，这就限制了无足机器人的发挥。目前有一种研究方向是将母机器人与连续型机器人结合(如



图 1-2

图 1-2)(文献^[1]): 利用母体将连续型机器人运送到指定位置,然后将连续型机器人伸入要探索的区域。连续型机器人会通过数据线将信息传递给母体,让母体对数据进行处理。这种字母式的方法虽然可以解决一些问题,但事实上这种组合中,连续型机器人只

是充当了探头的作用,这只能称作是母体机器人的一个部件,并不能称之为独立的机器人。

第二章 总体设计

2.1 机器人躯干

为了运动自如灵活，达到无足机器人的水平，对“半软式”机器人身体部分的设计，本文参考了文献^[1]有了几种方案：1、使用人工肌肉连在各个环状或半环状的支撑骨架。2、将弹性的圆柱状材料沿直径方向挖出几个圆柱形孔，控制运动时只需将气体或液体注入到所需的孔中。3、利用记忆金属。4、采用金属线控制。

1、使用人工肌肉连在各个环状或半环状的支撑骨架。人工肌肉是由弹性网组织包裹，里面有一个管状可膨胀的塑胶层，当橡皮管中充满空气时，直径就会膨胀，长度缩短，与用力时的肌肉收缩十分相似。运动时通过肌肉的收缩和扩张，

使身体各部分不同程度地弯曲（文献^[2]）。然而，如果要模仿蜈蚣类的昆虫，那么每个环节处都得至少有三块人工肌肉，这样才能做到有效控制。但这样会导致机器人体内塞满了气动用的橡胶管，没有其他空间放置其他东西。并且控制起来过于繁杂，不易操作。所以这种方法舍去不用。

2、将弹性的圆柱状材料沿直径方向挖出几个圆柱形孔，控制运动时只需将气体或液体注入到所需的孔中。这也是对人工肌肉控制的改进版。然而要达到效果，只是沿圆柱截面均匀打上4个孔是不够的，因为要让弹性物体膨胀从而产生的形变的话，如果材料弹性强，则导致孔变形而身体弯曲不明显，如果弹性弱，则有可能导致材料破裂。因此就要增加孔的直径或个数。如果要保证外形不增大，那么想增大孔的直径就意味着内壁增厚，内部空间的减小。或者增加孔的个数，但这样的话，控制弯曲动作的逆运算就会很麻烦，不容易真正实践运用。

3、利用记忆金属。记忆金属可以根据温度的不同改变自己的形状。通过查资料可知，目前已经有一种能够利用电流瞬时加热的方法实现金属的收缩和舒张。但是这种记忆金属的伸缩能力有限，导致了弯曲的角度较小。所以这种方法也不合适。

4、本设计最终采用了金属线控制的方法。

躯干由7块铝合金骨片支撑，形状如图2-1。骨架外形没有设计成上下对称的形状是因为贴近地面部分的身体周围有空间没有利用到，因而为了最大限度地减小机器人的截面积，因而采取了如图的设计。四根合金线（高强度NiTi合金，目前已有类似应用）穿过骨架上的小孔，中间的大孔预留给控制电缆和数据线以及其他设备的空间，设计成半圆状而不是圆孔状也是为了最大限度地利用内部空间。

为了防止骨架出现前后滑动，使用弹性半圆柱型材料

穿过所有骨架的大孔并与骨架连接，同时弹性材料内部也要掏空。控制金属丝收放的电机分前后两组，每组控制一半长度的身体，即从一端穿过3块骨架与第四

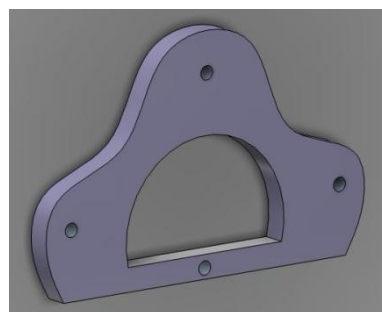


图 2- 1 骨架

块相连,两组电机分别放置在机器人的头尾两处。

线控制具体原理是,当一端的电机转动时,带动所控制的金属线收缩骨架末端受到向的拉力 F , 拉力 F 使得弹性材料弯曲。而弹性材料是一个整体,所以力会传到其他部位,使得其他部位也产生弯曲。这样,整段身体就会产生向上的弯曲。(见图 2-2)

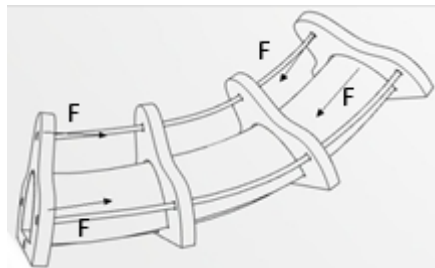


图 2- 2 受力示意图

为了不阻碍身体的弯曲,另一边的控制电机控制金属线伸长。以上下弯曲为例,对前半段身体分析(后半段情况相同)。如图 2-3 假设骨架的弯曲中心为 O 点,上边的金属线 S_1 到 O 的距离为 h_1 ,下边金属线 S_2 到 O 的距离为 h_2 ,前半段身体全长为 L ,弯曲 θ 度,则金属线 S_1 和 S_3 的收缩长度为:

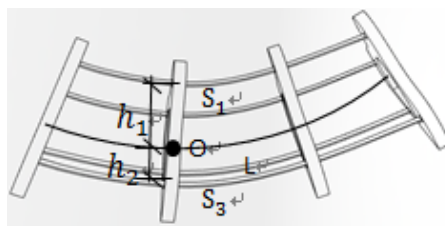


图 2-3 弯曲长度分析

$$\Delta S_1 = \left(\frac{L}{\theta} - h_1 \right) \times \theta = L - h_1 \times \theta; \quad \Delta S_2 = \left(\frac{L}{\theta} + h_2 \right) \times \theta = L + h_2 \times \theta$$

因为骨架上下不对称,所以左右的金属线长度也会有变化,变化长度的计算方法同上,不赘述。

当机器人左右运动时,上下金属线长度不变,左右金属线收缩或伸长,情况与上面类似。

虽然线控制方法会有一些控制不精确的缺陷,但机器人在爬行时精准性可以通过腿部调节等方法补足。同时这种控制方法扭转能力强,使机器人更加灵活,而且所需的金属线不会很多,从而可以简化机器人的构造,减轻重量,为内部留出足够多的空间。

2.2 腿部设计

关于腿部的放置位置,本文最初设计将其放在躯干连接部的两侧,因为这样可以缩小机器人的横截面积。但考虑到在运动过程中腿部的运动幅度会被两侧的骨架限制住,尤其是当机器人扭曲身体的时候最为明显。所以最后还是选择放在骨架的两侧。在对腿部结构的选择中,有以下 4 种思路。1、圆盘加杠杆驱动。2、人工肌肉驱动 3、线控制法 4、双自由度电机驱动。

第一种方法是:在每个骨架上,垂直于骨架平面添加一个小型圆盘,圆盘上非中心处有一个杠杆连接点,杠杆中间偏身体一侧有一点固定在骨架上(可以转动),外侧则是一个与此杠杆成一定角度下垂的刚性杆,用作腿的支撑部分。当圆盘转动时,杠杆另一端也会画出圆弧状轨迹,这样腿就可以运动了。这种设计可以省去很多个独立的电机,只要 4 个左右的电机就可以完成驱动工作。(分别控制前左、前右、后左、后右四个部分,以便完成一定的动作)然而在实际应用的时候,考虑到机器人在弯曲身体的情况下齿轮带不能很好地传动,同时如果齿轮过大会造成妨碍身体扭曲,而过小会使得转动的力矩很大,增加了机械的负荷。

第二种方法与之前躯干的论述一样,因为仿蜈蚣类的机器人需要很多条腿,若每条腿都装上人工肌肉,会显得没有必要,而且装置太占空间,所以放弃。

第三种方法是让控制腿部的线与躯体控制的线共用电机,这样可以省去很多重量。但是由于这样的设想从结构上很难做到,所以也舍去。

第四种方法是最终采纳的一种。如图 2-4 所示, L1、L2、L3、L4 是刚性连杆。1 和 2 两处是从动转轴, 其中 1 固定在与 L4 垂直的长方体 M 上。电机装在 A 和 B 处, A 在水平面内转动, B 在垂直面内转动。当 A 转动时, 长方体 M、连杆 L4 以及与之相连的 L1、L2、L3 一起围绕 A 的轴转动。这样就可以完成水平方向的运动。

在 L1 的内部开有圆柱形槽(如图 2-5), L2 末端连有一个半径与圆柱相同的球体, 球体卡在圆柱形槽内。当 B 转动时, 带动 L2 摆动, 小球在槽内滑动, 从而使得 L1 前后、上下运动。

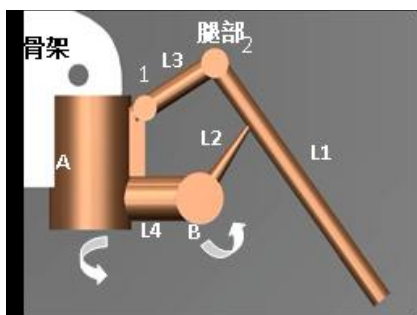


图 2-4

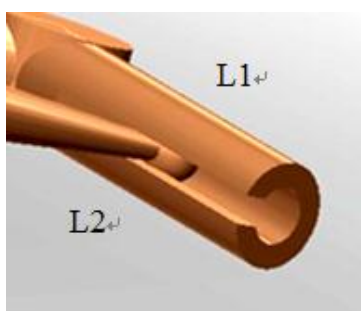


图 2-5

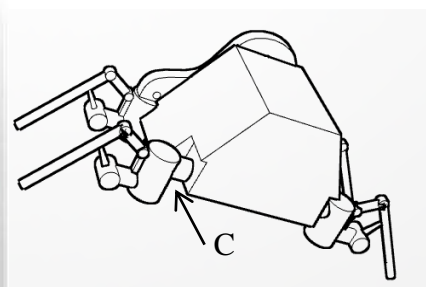


图 2-6

特别地, 对于头部和尾部的足, 由于运动时有额外需求, 所以增加一个自由度, 使之可以绕柱 C 旋转。(如图 2-6)

采用双自由度电机驱动的机器人足部, 有灵活、力量足、便于程序上控制、技术成熟等优势。虽然与之前的圆盘杠杆法在重量上处于劣势, 但是由于这样的设计使得单条腿的力量明显增大, 所以重量上的劣势可以借此来弥补。

2.3 总体构型

综合以上所说, 本设计采用仿蜈蚣、马陆等多足爬虫动物设计, 将柔软的躯干和一定数量(本文讨论的是 9 对的情况)的腿肢结合起来。使用分段式结构, 将机器人躯干分成前后两段分别控制, 并把电源、探测器或工具放在机器人的两端。其中头和尾部多设置一对足, 以承受器件的重量, 且有三个自由度, 以便运动时方便完成动作。

这样的设置可以保证机器人重量分配相对均匀, 二可以使得机器人在狭窄空间不能掉头时可以逆向操作。整体效果图如图 2-7 所示

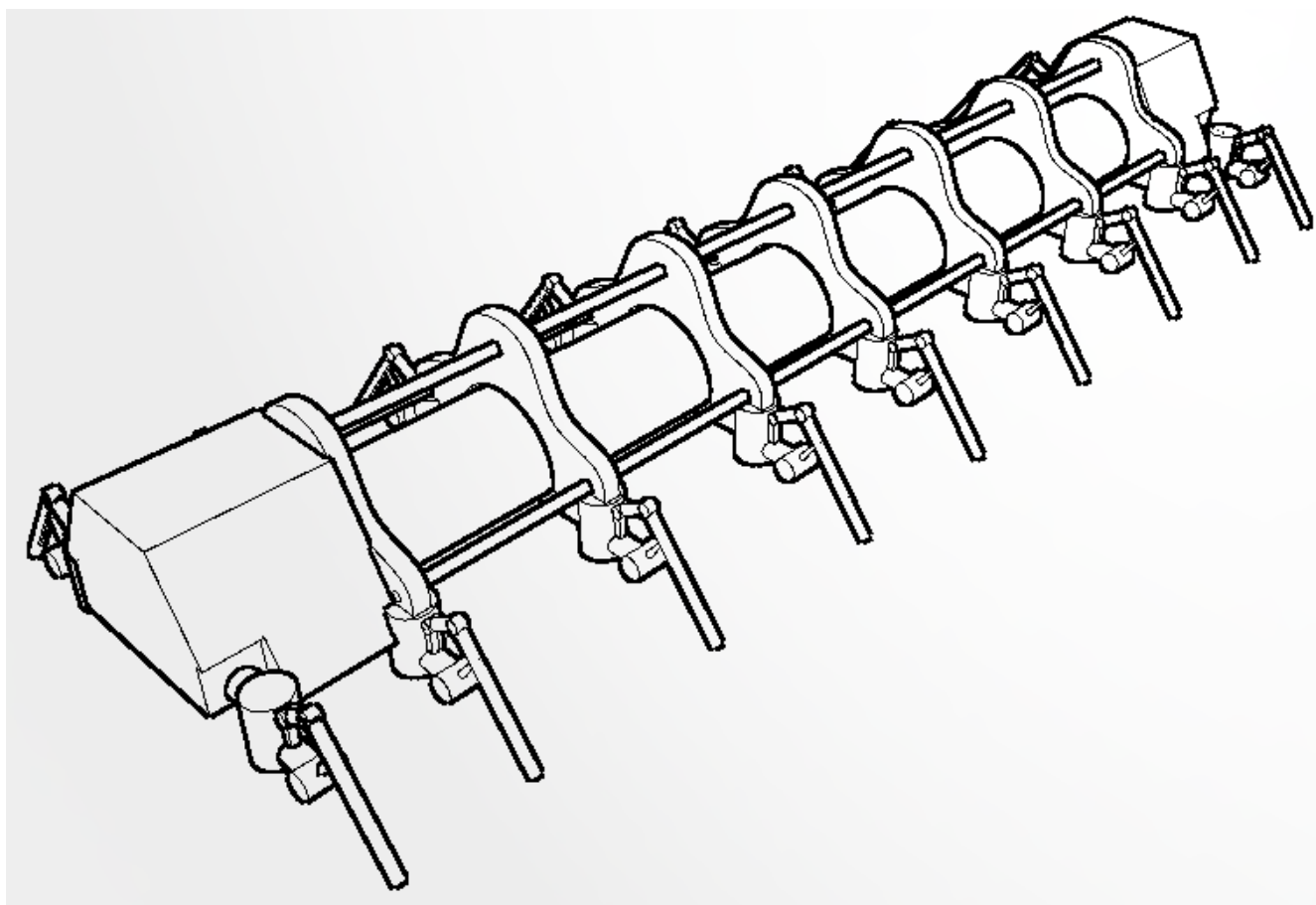


图 2-7

第三章 运动分析

3.1 直线行走

3.1.1 平坦路面直线前进

机器人直线前进时，将 9 对足分成前中后三组。如图 3-1 所示，每组的足部有三种相位，分别是 1、2、3 和 0 相位。方框代表骨架，圆圈代表腿的位置。0 相位表示腿的静止状态。运动时三条腿分别对应着 1、2 和 3 相位，每条腿按箭头方向顺时针变化位置。从 1 相位到 2 相位，电机 A 逆时针转动 α 度，电机 B 向下旋转 β 度；从 2 相位到 3 相位，电机 A 顺时针旋转 2α 度，电机 B 不动；从 3 相位到 1 相位，电机 A 逆时针旋转 α 度，电机 B 向上旋转 β 度。

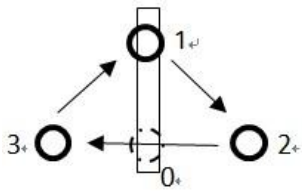


图 3-1

同一侧的所有腿保持相邻两条腿中靠前一条所处的相位是靠后一条所处相位的下一相位，两侧的对应腿之间始终保持相位差为 1。图 3-2 为机器人向前运动一步的俯视图，圆圈代表落脚点，网格部分是头仓和尾仓。

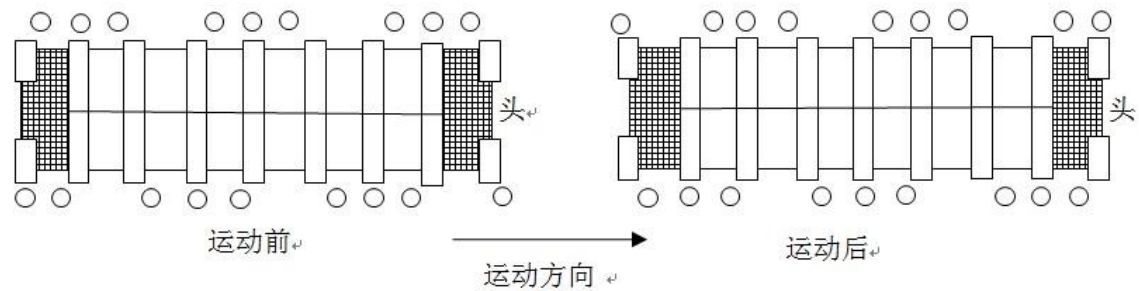


图 3-2

3.1.2 崎岖路面直行

崎岖路面上行进的腿部运动方式和平直路面一样，但柔软的躯体却可以显示出优势。行进过程中，只要路面障碍低于机器人腿部最大抬升高时（也可以是坡面），机器人可以像在地面上一样自由行走，柔软的躯干会因为重力的原因自动与地面贴合。为了让机器人能自由地根据地形弯曲身体，在行进的时候，控制金属线的电机逆转，使金属线的长度大于身体平直状态下的长度，处于松弛状态。这样就可以使得机器人躯干运动自如了。

3.2 曲线行走

根据机器人的特性以及模仿昆虫的运动特征，以下提供两种转弯方法。

3.2.1 平面转弯

在平面内转弯，需要腿部步幅随角度变化而改变。

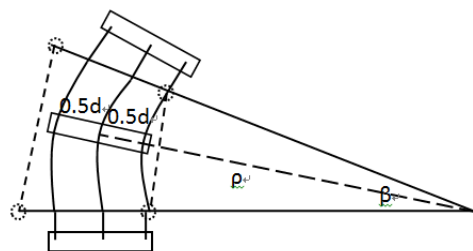


图 3-3

如图 3-3 设需要向前进方向右侧转过 β 度, 正常直行时每条腿步幅为 x , 处于转弯位置的身体的曲率半径为 ρ , 两腿间宽度为 d 。

则正常步幅 $x = \rho\beta$ 内侧腿的步幅 $x_1 = 2(\rho - 0.5d)\sin(0.5\beta)$, 外侧腿步幅 $x_2 = 2(\rho + 0.5d)\sin(0.5\beta)$ 。

3.2.2 空间转弯

平面转弯的半径由于外侧腿的步幅受到身体宽度和腿长的限制, 转弯半径不能过小。而观察马陆等爬虫可以发现, 有时候当在平面内转弯的半径大于自己所需要的转弯半径时, 会选择使用抬起上身转弯的方法获得更小的转弯半径。因而模仿爬虫, 半软式机器人也可采用抬头转弯的方法实现前进方向的改变。具体如下:

以右转为例。如图 3-4 所示, 控制前半部分身体的控制电机接通, s_1 金属线收缩, s_3 金属线伸展, s_2 、 s_4 略伸长, 使得机器人身体前半部分抬起。然后 s_4 金属线收缩, s_2 伸展, 使得机器人前半部分向右转动, 当转动到指定位置时, s_1 金属线伸展, s_4 收缩, 使得机器人前半部身体回到地面。然最后根据之前所确定的转角, 得到驱动机器人所需的相应步幅。

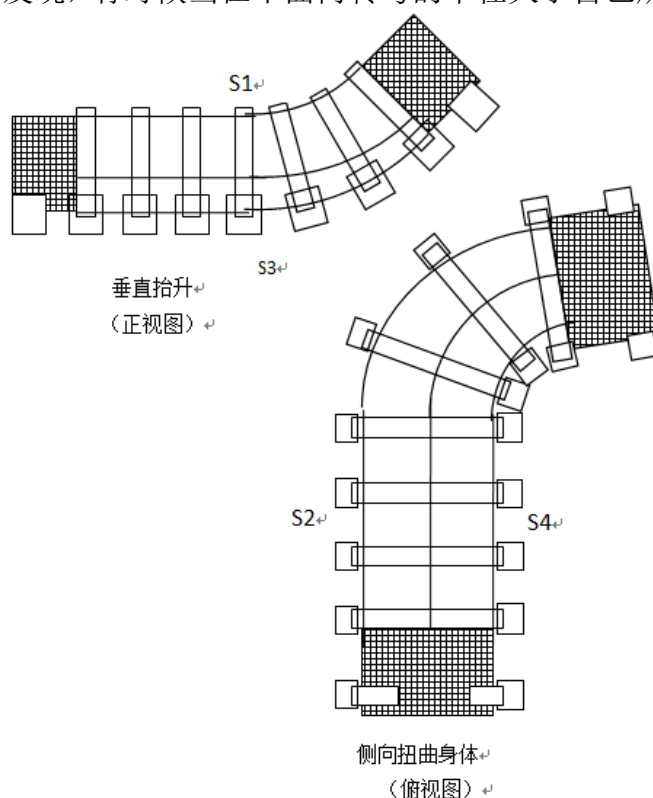


图 3-4

3.3 翻越障碍

虽然机器人足部的抬起高度有限, 但通过对躯体的弯曲, 可以达到翻越更高障碍的目的。

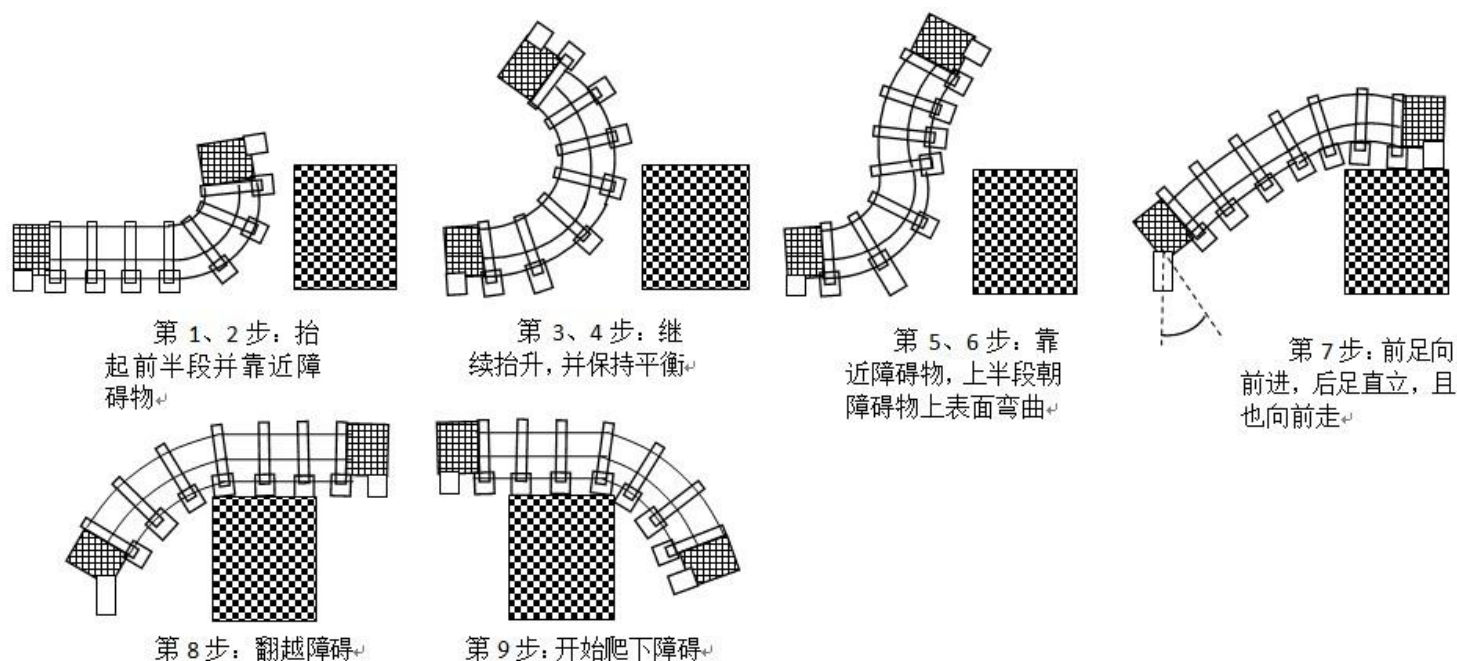


图 3-5

方法如下（如图 3-5）：

- 1 弯曲前段身体，使得前部抬起。
- 2 驱动后段身体的 5 对足向前行进，使机器人靠近障碍物。
- 3 驱动后三对足的 B 电机不同程度地向下旋转（见图 2-5）使得身体后半部分向后抬起。
- 4 使后段身体向上弯曲，让前段身体弯曲度微微减小一些，保持重心在后段身体约二分之一的地方。
- 5 驱动后段身体的后三对足向前前进，使得身体贴近障碍。
- 6 迅速使前段身体向下弯曲，使得身体前部肢体靠在障碍物上表面上。
- 7 前足搭在障碍物上表面，前后两段身体弯曲度同时减小，与此同时尾部的最后一对足旋转 α 度，使得这对足立在地面上。
- 8 前段身体的腿向前运动，尾部的支撑腿交替前进（若障碍物过高，则有可能前进一段距离后，支撑腿就脱离地面了），前段身体随机器人前进而减小向下的弯曲度（到平直状态为止），后段身体随机器人前进而增加向下的弯曲度。
- 9 当第五对足运动到障碍物上表面后，前段金属线伸长，使前段处于松弛状态。后段停止向下弯曲，机器人前进时，后段随机器人前进而向上弯曲以减小弯曲度（直到平直状态）。
- 10 当第五对足运动到障碍边缘时，开始下障碍过程。下障碍的过程是上障碍的逆过程，不再重复。

3.4 跨越沟壑

跨越沟壑是此机器人的一个特点。假设缝隙宽度不超过机器人全长的一半（超过一半时有两种方法，一种是跳跃法，第二种是质心转移法，蜗牛跨越缝隙

是一个典型的例子。但这些方法不适用与本文讨论的机器人)，则让机器人前段身体微微向上抬（防止跨越运动过程中出现倾倒而导致前足高度不够。此时能跨越的长度应比全长 $1/2$ 小），后段身体绷直（即金属线拉紧）。然后驱动机器人向前进，当机器人前端到达缝隙的另一端时，前段身体恢复笔直状态。继续向前运动，此过程机器人全身都保持紧绷状态，当运动到末端离开地面时，微微抬起后

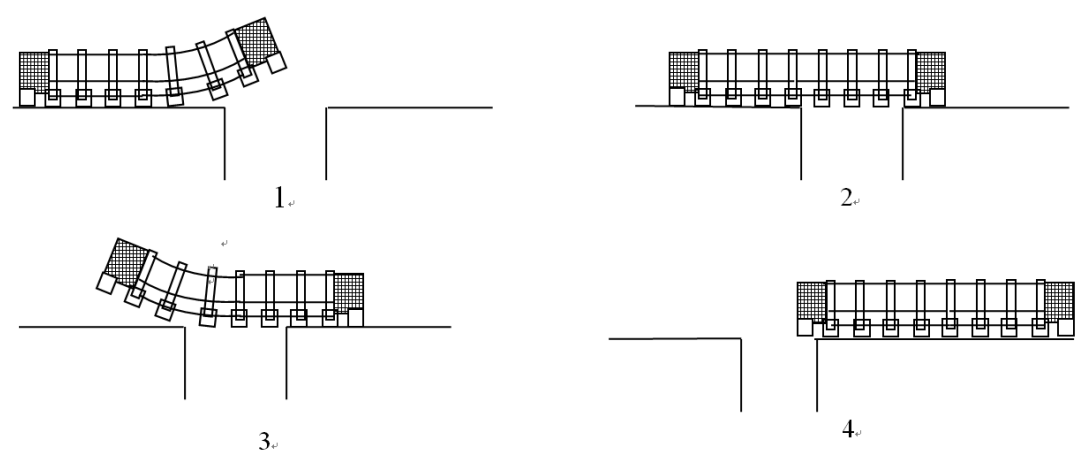


图 3-6

段身体，以便后段腿肢能落在地面上，不被缝隙边缘卡住。

跨越示意图为图 3-6。

此法虽然与长形履带式机器人跨过沟壑的方法相比没有太大的区别，但由于“半软式”多足机器人身体柔软，可以增加长度而不影响其在狭小空间的运动，而履带式机器人则不能随意加长。从这点考虑，此机器人具有长形履带式机器人的优点而避免了其缺点。

3.5 钻洞

当机器人遇到截面宽度和高度略大于骨架尺寸（小于腿部展开时的宽度）的洞口，且洞口深度不超过机器人全长的 $1/2$ 时，可以让机器人收缩腿肢，利用洞外的腿肢驱动机器人穿过窄洞。

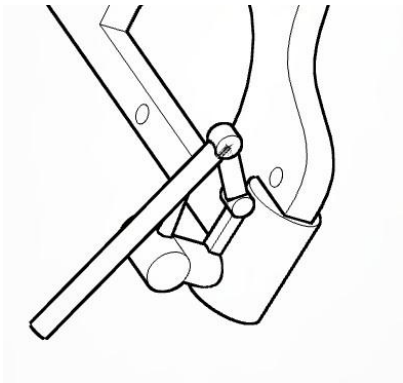


图 3-7

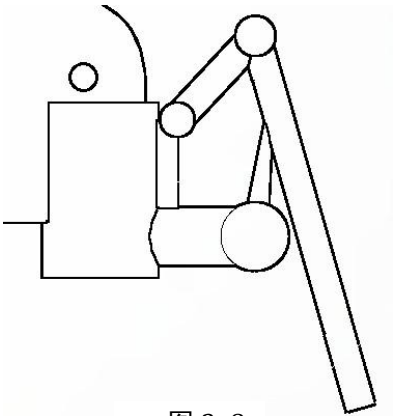


图 3-8

要穿过洞口时，全身金属线绷紧第一对足 c 电机驱动其向前旋转，B 电机向

上旋转收缩腿部，A 电机逆时针旋转使腿藏于头仓下方。然后机器人向前运动，机器人记录下前进距离，当第二对足贴近洞口时，第二对足的 B 电机向上运动，收缩腿部（如图 3-8）A 电机顺时针旋转（俯视）（如图 3-7）。接着继续前进，依次收缩各条腿。最后末端的腿变化方式同第一对足。前端的足在机器人利用距离传感器测出已经穿出洞口后展开成正常状态，然后向前运动。

（如果考虑到腿部力量如果够大，那么可以在一部分躯干接触地面的情况下，依靠腿部的推力克服摩擦，使之穿过洞口。这样可穿越的洞口长度会更长。）

第四章 设计缺陷

1、线控制方法由于可能出现弯曲不均匀、骨架略微滑动的问题，导致控制不够精确。

可提供的解决方案：可以通过腿部调节方法补足，或预先对所用的弹性材料进行测试，以获得弯曲参数。

2、多足机器人由于腿数目很多，有可能耗电量会比较大。

可提供的解决方案：使用电容量大且质量轻的电池，但可能造成成本上升。

3、在机器人翻越障碍的过程中，由于重心的太高，可能导致机器人稳定性下降，有可能会偏倒。

可提供的解决方案：降低操作速度和身体弯曲的速度，减小可能出现的晃动。

第五章 应用前景

这种“半软式”多足机器人除了能在抗震救灾等方面有所发挥，还能在如探险、科学考察、考古等方面做出贡献。例如 2002 年对埃及胡夫金字塔王后寝室南通道进行探秘的过程中，美国科学家就使用了机器人穿过通道进行探测考察。当时使用的是一种履带式长形机器人，这种机器人在平直空间运动很方便，因此应对笔直的通道是不费力的。然而如果通道是蜿蜒曲折的，那么这种机器人则会完全排不上用场。但如果是仿生类的“半软式”机器人，则可以利用柔软的身躯顺利地通过。

而在实际的环境里，寻找一条笔直的通道时常是不现实的。如洞穴、岩石缝隙等具有崎岖路面、狭窄空间的环境，是科学家经常要面对的现实。如果可以利用“半软式”机器人，那么科学家的工作会更加轻松。

此外，除了可以在陆地上使用外，也可以在水下使用。目前在水下使用的机器人都是悬浮在水中的，这样在调查水下的废墟或洞穴时控制起来不方便。如果把“半软式”多足机器人做防水处理，同时在体内做出一个类似鱼鳔的浮沉子，则机器人就可以更加方便地进入洞穴等探查。

第六章 参考文献

- [1] 孙立宁, 胡海燕, 李满天. 连续型机器人研究综述[A]. 机器人 ROBOT, 2010, (5)
- [2] 胡海燕, 王鹏飞, 孙立宁, 赵勃, 李满天. 线驱动连续型机器人的运动学分析与仿真^{*} 机械工程学报. 2010, (19)
- [3] 任嘉慧, 刘念荫. 形形色色的机器人[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [4] 陈学东, 孙翊, 贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006