

全国第二届机器人学术讨论会

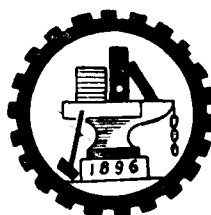
863—512

全方位小支撑四足步行机器人

论文集

2nd. National Symposium on

Robots Proceedings



上海交通大学步行机器人课题组

一九八九年七月

序

言

全国第二届机器人学术讨论会是全国机器人技术在基础理论研究、工程应用与推广等各个领域中的大检阅。我们借此机会奉献上这本论文集，作为向大会的汇报与献礼。

我国机器人技术发展已进入了一个新的阶段，机械手的研制正进入商品化阶段，步行机器人的研究与开发也提到了议事日程。

近一年多来，我们承接了国家高科技智能机器人领域中步行机器人方面的研究项目，从生物力学、机构学以及控制工程三个方面对步行机器人，主要对四足步行机器人进行了初步的研究。本论文集反映了一年多来我们在这几个方面所取得的研究成果。所有论文均经863智能机器人主题办公室评审组审阅通过。

论文集中生物力学部分，主要是对马的各种步态进行了实验研究与理论分析；机构学部分，研究了四足步行机器人的几种步态规划，步行机构的参数选择，以及步行机器人的运动学、动力学和稳定性；控制部分，研究了四足步行机器人控制软件的设计与系统稳定性分析；最后，对近期内四足步行机器人的研究方向和目标提出了初步的规划。

步行机器人的研究工作还刚刚开始，还有许多课题有待我们去开发与解决。我们希望通过这次会议能从中得到教益与提高，更希望有志于步行机器人研究的同仁们加强联系与协作，为促进我国步行机器人基础研究与应用技术的发展而共同努力。

上海交通大学步行机器人课题组

一九八九年七月

目 录

序 言

- 一、 马的步态实验和分析 1~7
王伟民 杨海兴 刘延柱
- 二、 JTUB-I 型四足步行机的机械设计 8~16
马培荪 陆顺寿 俞海
- 三、 2n 足步行机运动学分析 17~25
胡宇方 黄宇中
- 四、 四足步行机的动力学方程 26~34
杨海兴
- 五、 四足步行机步态运动模拟和行进中步长的调整 35~44
吕恬生
- 六、 四足步行机转弯功能的实现 45~56
马培荪 吴凡*
- 七、 四足步行机跨沟前后的步态分析 57~63
马培荪 俞海 黄宇中
- 八、 四足步行机的稳定性和步态优化 64~72
何奇伟* 马培荪
- 九、 按最大实用工作空间选择缩放式腿机构参数 73~77
朱建敏*
- 十、 四足步行机器人 C 语言控制程序设计 78~86
程君实 潘俊民 汪球 吴立卫
- 十一、 四足步行机伺服系统的稳定性分析 87~98
潘俊民 吴立卫 汪球 程君实
- 十二、 小支撑全方位四足步行机的研究 99~104
马培荪 潘俊民 吕恬生 杨海兴 程君实

马的步态实验和分析

王伟民 杨海兴 刘延柱
(工程力学系)

摘要 本文采用高速摄影记录方法分析马的平地行走, 上、下台阶和跨越障碍物、陷坑等五种步态。所得结果为四足步行机器人的研究提供了依据。

研究四足动物在各种条件下的步态是四足步行机器人设计的基本依据。动物学专家 Alexander 在这方面做了大量工作⁽¹⁾。本文采用高速摄影记录方法分析马在平地行走, 上台阶、下台阶, 跨越障碍物和跨越陷坑等五种动作时的步态, 得出马腿的杆状图以及占空比、相位等参数, 并利用五点三次平滑法和三角函数拟合法计算马腿各关节转角参数。分析表明, 马在作以上五种动作时采用对边次序和对角次序两种基本步态, 前者适用于较为简单的动作, 后者适用于较为复杂的动作。这两种基本步态均为组合步态, 即在一个完整的步态中, 静态过程和动态过程交替进行, 两者所占时间之比约为 2: 1。

一、马腿的力学模型

马腿的运动是复杂的空间运动。但在分析以上五种动作时, 为便于研究, 忽略其横向补偿运动, 简化为纵向平面内的平面运动。图 1 (a) 以髌骨 BH, 大腿骨 HK, 小腿骨 KA 用圆柱铰相连表示马腿。这样的力学模型是一个具有五自由度的系统, 可取 B 点的坐标 X 、 Y , 髌骨 BH 相对铅垂线的夹角 α , 大腿骨 HK 对于髌骨的相对角度 γ , 以及小腿骨 KA 对于大腿骨的相对角度 δ 为广义坐标。马蹄很小, 看作与小腿骨连成一体, 简化为 A 点。

对马在平地行走的测试表明, γ 值变化很小, 可视为不变, 即髌骨和大腿骨可简化为一根骨 BK, 如图 1 (b) 所示。因此, 平地行走的马腿模型的自由度缩减为四个。

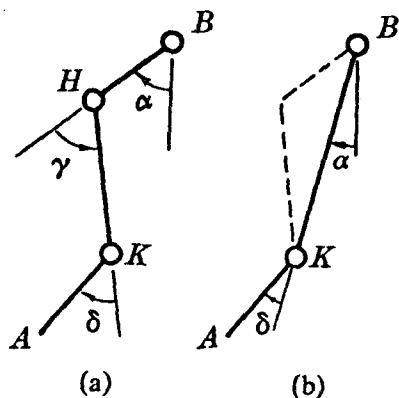


图 1 力学模型

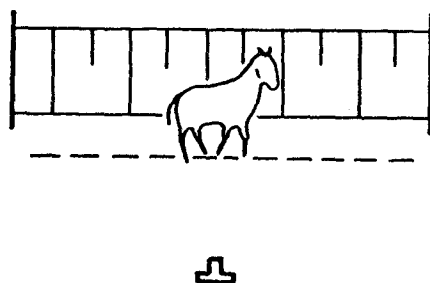


图 2 摄影示意图

二、步态实验和误差分析

实验采用高速摄影,记录马完成上述五种动作的完整步态。摄影示意图见图2,摄影机放在由垂直杆记杆和白布组成的参照物正前方8米左右的位置上,马的三个关节点B、H、K上分别贴有圆形标记。摄影后将底片放大,用分析仪加以处理。

此实验主要误差为比例误差、方向偏差误差和标记位置误差。

比例误差如图3(a)所示。参照物长度AA'和实物长度BB'在照片上看是相同的,但实际上并不同,存在相对误差为

$$\Delta_1 = (L_s - L) / L \quad (1)$$

由于是平面运动,该项可通过乘一比例系数 $a = L / L_s$ 加以修正。同理,在底片放大时,由于放大倍数较大,放大比例不一定一致,也会产生比例误差。为此采用对每张放大照片确定原点和比例尺度的方法加以修正。

方向偏差误差如图3(b)所示。摄影机拍摄的坐标为 $X' = X \cos \alpha + Z \sin \alpha$, 其相对误差为

$$\Delta_2 = (1 - \cos \alpha) + (Z / X) \sin \alpha \quad (2)$$

参考零点应取在实物运动范围之外,使 $X \neq 0$, 为计算方便可取 $Z = 0$ 。实验时,地面应画出直线,人牵马尽可能沿直线行走,以保证被摄物体与摄影机垂直而减少误差。

由于所粘标记是位于关节毛皮上,运动时会产生标记误差(理想关节点应为骨髓上标记)。尤其对于髌部,因为肌肉发达,误差更甚。这一误差,本文采用分析方法加以修正,即以髌骨长度基本保持不变原则修正标记点。同理,在用分析仪点入标记点坐标时,也会产生标记误差,采用多测几次取平均值的方法加以修正。

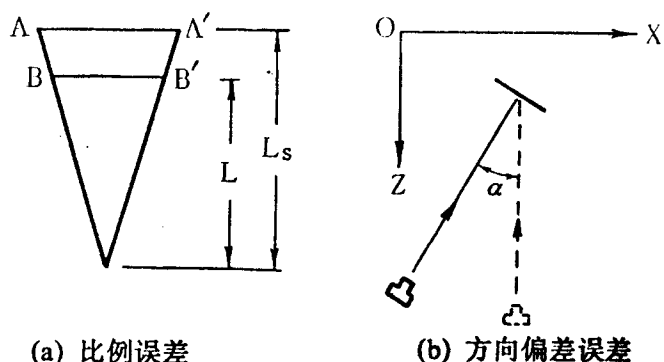


图3 误差示意图

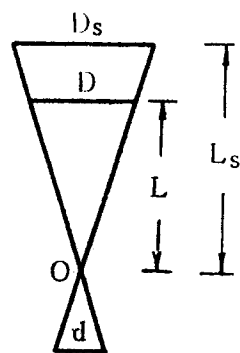


图4

三、步态实验数据处理方法

将照片上的参考点,各关节标记点及着地点利用分析仪输入微机,得到步态实验数据。这些数据必须加以处理。

1. 像、物空间坐标变换

设像、物空间坐标分别为 (X_p, Y_p) 和 (X, Y) , 二参照点像空间坐标为 (X_0, Y_0) 和 (X_1, Y_1) , 像长 $d = \sqrt{(X_0 - X_1)^2 + (Y_0 - Y_1)^2}$, 参照点实际长度为 D_s (见图 4), 则像、物空间坐标转换式为

$$(X, Y) = \lambda(X_p, Y_p), \quad \lambda = LD_s / Lsd \quad (3)$$

2. 数据平滑

采用五点三次平滑法进行数据平滑。即用三次抛物线以最小二乘法拟合与 Y_i 最邻近的五个点: $Y_{i-2}, Y_{i-1}, Y_i, Y_{i+1}$ 和 Y_{i+2} , 得出 Y_i 的修正值。设 $2n+1$ 个等时分点上数据为 $Y_{-n}, \dots, Y_n$, 采用五点三次平滑法修正值为 X_i , 则有

$$X_i = (-3Y_{i-2} + 12Y_{i-1} + 17Y_i + 12Y_{i+1} - 3Y_{i+2}) / 35 \quad (i = -n+2, \dots, n-2)$$

$$X_{-n} = (69Y_{-n} + 4Y_{-n+1} - 6Y_{-n+2} + 4Y_{-n+3} - Y_{-n+4}) / 70$$

$$X_{-n+1} = (2Y_{-n} + 27Y_{-n+1} + 12Y_{-n+2} - 8Y_{-n+3} + 2Y_{-n+4}) / 35 \quad (4)$$

$$X_{n-1} = (2Y_{n-4} - 8Y_{n-3} + 12Y_{n-2} + 27Y_{n-1} + 2Y_n) / 35$$

$$X_n = (-Y_{n-4} + 4Y_{n-3} - 6Y_{n-2} + 4Y_{n-1} + 69Y_n) / 70$$

由式(4)进行多次平滑得到修正后的各坐标值及转角值。

3. 数据拟合

由平滑后获得的各个运动参数可采用多种方法进行拟合, 以求出导数值。对于马腿的运动, 各关节角度参数 α, γ, δ 一般是周期函数, 因此采用三角级数拟合较为适宜。

设转角函数为 F_k , 则

$$F_k^{i*} = F_k^i + c_k^i \quad (i = -n, \dots, n) \quad (5)$$

其中 F_k^{i*} 为 iT_s 样本测量值, $T_s = T / (2n+1)$ 为样本时间间隔, F_k^i 为 iT_s 准确值。则

$$F_k \approx a_0 + \sum_{j=1}^m (a_j \cos \omega_j t + b_j \sin \omega_j t) \quad (6)$$

其中 $\omega_j = j 2\pi / T$, $0 \leq t \leq T$, $m \leq \frac{n}{2}$ 且为正整数。式(6)中以最小二乘法计算得最佳系数值为

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^n F_k^{i*} \\ a_j &= \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^n \cos\left(\frac{j i 2\pi}{2n+1}\right) F_k^{i*} \\ b_j &= \frac{1}{2n+1} \sum_{i=-n}^n \sin\left(\frac{j i 2\pi}{2n+1}\right) F_k^{i*} \end{aligned} \right\} \quad (j = 1, \dots, m) \quad (7)$$

对式(6)求导, 即可得 F_k 和 F_k 。

四、实验结果和分析

1. 马的步态运动参数

定义周期 T , 相位 φ_j , 占空比 β_j , 步态运动参数 k 及步长 λ 如下:

T : 第一腾空足离地至第二次离地之间的时间;

φ_j : 第 j 腾空足滞后于第一腾空足腾空的时间与周期 T 之比;

β_j : 一周期内第 j 腾空足着地支撑时间与周期 T 之比;

k : 即行阵 ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$);

λ : 一周期内驱体移动的距离。

应该说明, 周期 T 仅对平地行走具有周期意义, 对其它动作, 则表示完成一个完整步态所需的时间。因此, 步长 λ 亦仅对平地行走有实际意义。五种动作的周期、步长及运动参数见表 1。

动作	T	λ	K
平地行走	0.88 秒	102cm	(0.34,0.34,0.34,0.34,0.18,0.50,0.68)
上台阶	1.06 秒	—	(0.34,0.36,0.34,0.36,0.26,0.53,0.74)
下台阶	1.08 秒	—	(0.35,0.32,0.35,0.20,0.32,0.56,0.80)
跨越障碍	1.44 秒	—	(0.42,0.29,0.40,0.39,0.29,0.49,0.75)
跨越陷坑	1.08 秒	—	(0.33,0.33,0.30,0.35,0.28,0.54,0.74)

表 1 周期、步长及运动参数

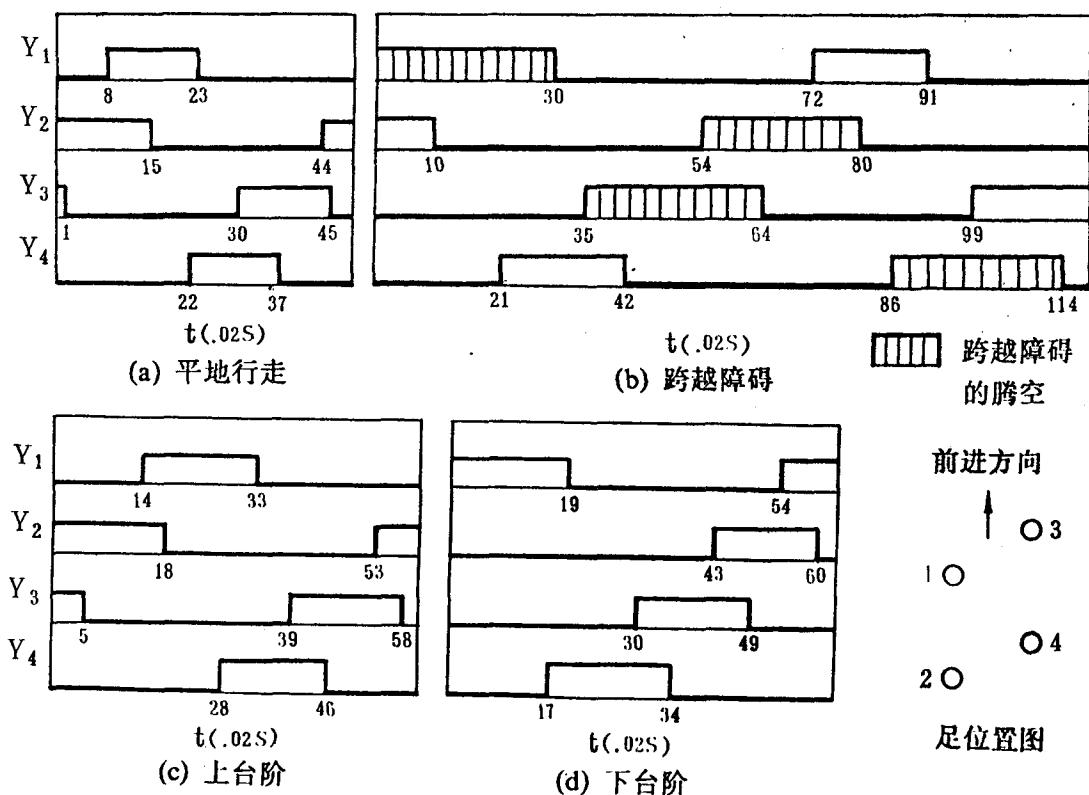


图 5 状态函数图

2. 马的步态状态图

足可以分为支撑和摆动二个状态, 引入以下状态函数 Y_i 来描述 i 足的起落顺序

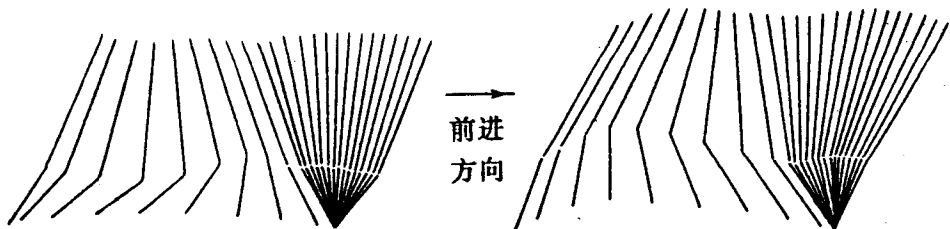
$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{摆动时(腾空)} \\ 0 & \text{支撑时(着地)} \end{cases} \quad (8)$$

这里的 $i=1, 2, 3, 4$ 分别对应于左前足, 左后足, 右前足和右后足。图 5 给出四种动作步态状态函数图, 跨越陷坑的状态图由于与跨越障碍类同, 没有在图中列出。

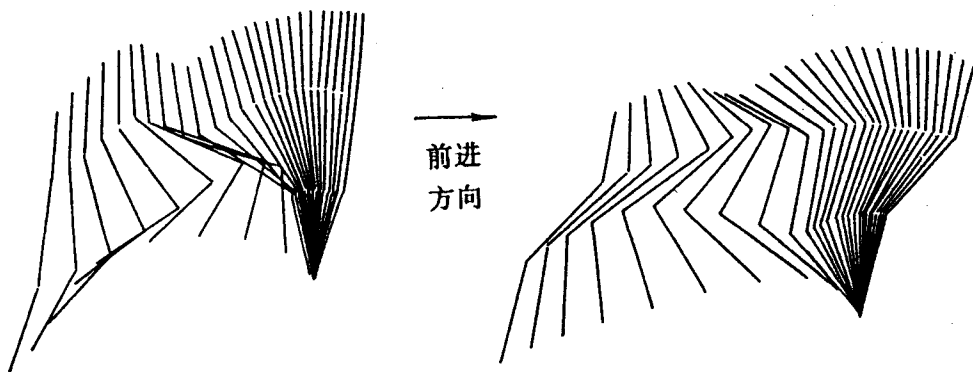
动作	转 系 数 角 值	前 腿						后 腿					
		α		γ		δ		α		γ		δ	
		A_j	B_j	A_j	B_j	A_j	B_j	A_j	B_j	A_j	B_j	A_j	B_j
平地行走	0	0.1				11.1		13.1				-20.4	
	1	14.7	-11.0			18.7	13.2	15.9	-4.1			6.3	-9.5
	2	5.1	3.2			-6.9	9.7	1.2	5.3			5.1	-2.7
	3	0.7	1.3			-7.1	-2.0	-1.6	-0.3			2.5	1.4
	4	0.2	1.1			-0.5	-3.3	0.6	-0.6			-0.1	0.5
上台阶	0	-4.5		-20.7		36.2		-22.5		52.3		-40.9	
	1	10.3	-1.2	8.1	-23.6	0.2	35.4	25.2	-20.2	-8.2	24.8	-0.8	-23.7
	2	-1.7	-0.8	13.8	5.1	-17.3	8.4	6.6	4.4	-8.7	2.3	12.2	-1.5
	3	0.0	0.3	-1.7	3.6	-5.2	-6.1	-0.1	1.9	-3.5	-3.2	2.2	5.3
	4	-0.4	0.2	0.2	-1.8	0.0	-1.0	0.6	-0.6	0.3	0.7	-2.3	0.1
跨越障碍	0	0.8		46.6		-62.4		37.1		-73.2		67.7	
	1	0.8	-26.2	-18.7	-12.5	37.9	12.4	-13.9	-8.3	30.9	-15.6	-32.2	-6.0
	2	7.0	-7.6	-12.3	1.4	3.5	-0.8	-0.8	0.8	3.4	-8.9	-2.1	0.4
	3	4.5	-7.5	-6.4	2.2	7.4	5.5	1.1	-0.2	1.9	-4.6	-0.9	-0.1
跨越陷坑	0	10.7		-33.7		47.7		-8.7		51.6		-38.9	
	1	-7.9	7.0	18.0	21.3	-37.9	7.4	5.3	17.0	-21.2	-4.1	10.5	15.0
	2	-5.0	5.4	5.1	5.0	-4.3	-1.1	-4.5	5.4	3.3	2.5	-0.5	3.3
	3	-3.4	3.4	2.1	3.7	-2.3	-2.4	-3.7	3.2	2.5	1.2	-2.5	2.3

表 2 关节转角参数

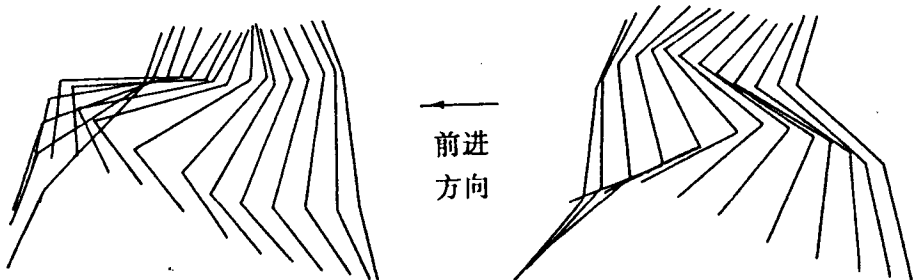
平地行走



上台阶



跨越障碍



跨越陷阱

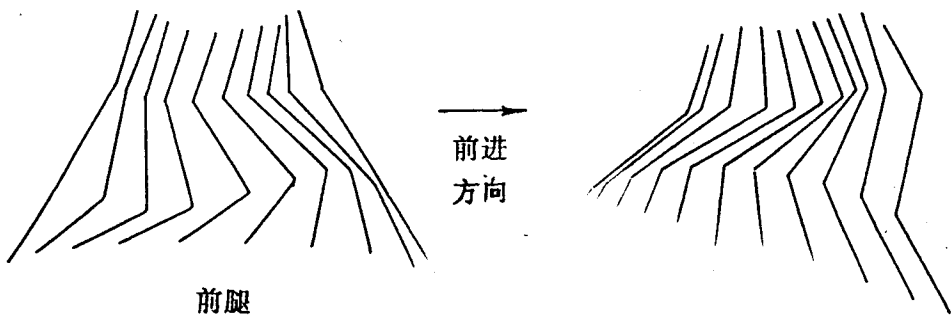


图 6

由状态函数图可以发现,马的基本步态有两种。一种是对边次序步态,即一侧足先动(先动后足,后动前足),然后再动另一侧足(也是先动后足,后动前足),这种步态对应于较简单的动作(平地行走和上台阶)。另一种是对角次序步态,即先动一侧的前足,再动对侧的后足,这种步态对应于较复杂的动作(下台阶、跨越障碍或陷坑)。两种基本步态中,静态过程和动态过程交替进行,两者所占时间之比约为 2: 1。以平地行走为例,一个步态为 44 个单位时间(每单位时间为 0.02 秒),其中 1-8、15-22、23-30、37-44 共 28 个单位时间内为静态稳定状态,此时一足腾空,三足支撑,驱体重心在三足支承面内;15-23、22-23、30-37 共 15 个单位时间内为动态状态,此时二足腾空,二足支撑,除 22-23 一单位时间为对角线支撑外,其作均为单侧支撑,驱体重心在支撑足连线一侧,驱体似倒置的复摆。

3. 腿的杆状图

在给出腿的杆状图前,各关节转角根据式(6)拟合,其最佳系数值如表 2 所示,限于篇幅,系数值仅列出前几项,但已有足够的精度。根据拟合的转角变化规律,画出腿的杆状图,如图 6 所示。

由杆状图可看出,对平地行走和跨越陷坑,马蹄和髋关节的高度变化均很小,对上台阶和跨越障碍,马蹄高度变化大,但髋关节变化仍较小,主要是通过增大各关节的相对转角来实现步态动作。运动时,髋关节上下波动小,以至能耗较小;各腿支撑有力,离地时动作变化明显,可使驱体重心提高,而着地前则变化平缓,能减小冲击力。各关节转角中, α 角变化较小,但 γ 、 δ 角变化较大,且前后腿摆动时方向相反,这是由于离地时后腿为踏蹬动作而前腿为收缩动作之缘故。

步态实验得到马培荪、胡宇芳等同志的热情帮助,谨致谢意。

参考文献

- (1) Alexander R.M. and Goldspink G., *Mechanics and Energetics of Animal Locomotion*, John Wiley & Sons, New York, 1977.

JTUB-I型四足步行机的机械设计

马培荪 陆顺寿 俞海

<机械工程系>

摘 要

本文介绍了所研制的小支撑全方位四足步行机模型, 主要对步行机模型中步行系统的设计, 传动系统的选择, 以及步行机模型的结构特点作了较详细的论述。

该步行机能够实现正常的步态, 采用正确的步态变换运动算法, 还可实现跨沟、越障及转弯等动作。步行是采用缩放式腿机构, 每一足共有三个自由度, 每个自由度由一台带测速发电机的直流伺服电机独立驱动。步行机传动系统由直流伺服电动机、减速器和丝杠传动组成。传动元件全安装在机体上。为便于进行各种步态的试验, 选择最优的运动空间和步行机构尺寸参数, 步行机构的结构参数设计成可调节的。

控制装置由IBM-PC/XT微型计算机、专用接口、12套模拟伺服电路及电源组成。各自由度变量由电位器进行测量, 并通过A/D变换器反馈给计算机。另外, 步行机每条腿的足底装有接触传感器, 这四个着地信号及12个自由度的到位信号以开关信号形式也反馈给计算机。

由于国产电机品种的限制, 加之传动元件效率不高, 所以该步行机还有待进一步改进与完善。

一、引 言

为扩大机器人的适用范围, 满足机器人在恶劣环境下移动的需要, 六十年代出现了最早的步行机器人雏形(Shigley 1960, Baldwin 1966)。至今研究的步行机器人足数有单足、两足、三足、四足、六足和八足等, 其中类似于动物的四足步行机, 静态步行比少于四足的步行机容易解决, 而动态步行的性能又优于高于四足的步行机。如果能在四足步行机中解决动态步行的问题, 那么无论从实用价值, 可运动性以及结构紧凑性等方面都具有独特之处。为此, 本文作者选择四足步行机作为研究与开发的对象, 并研制了第一代四足步行机模型——JTUB-I型。

本文将说明它的设计原理、结构特点, 步行机构参数选择以及有待解决的问题。

二、步行系统的设计

目前运输机械都以车轮和履带作为行走系统的机构。对于平坦、坚硬的地面，带轮子的运输机械是最理想的；对于未经开垦的地面，履带爬行的运输机械具有较大的机动性。然而，它还存在如下问题：1) 在不平坦地面上运动的机动性仍然不高；2) 在不平坦地面上运动时，机体会产生很大的摇摆与颠簸；3) 在松软的地面上运动时能耗较大。可见，要开发一种能够自由地在不平坦地面上运动，并且具有较高的能量利用率和较高的地面适应能力的运动机械，宜采用仿生的运动机构作为步行系统。这种步行系统就是步行足。

要充分发挥步行足系统的功能，在设计中考虑了以下几方面。

1. 腿数的选择

在步行机设计时，腿数目的合理选择是很重要的。对于实用型步行机的研制，只能从使机器具有一种简单的功能开始。因此，我们选择了静态稳定的行走方式作为设计的依据。实现这种行走方式的最少腿数为四条。到目前为止，国外已经研制出四足、六足和八足的步行机，其中六足步行机被认为最有发展前途，大多数的研究也都是围绕六足步行机进行的。

和这种趋势相反，我们选择了四足步行机作为研究对象，其原因在于：

(1) 为了能适合于实际应用，必须保证步行机在静止时具有稳定的站立姿态。这时，步行机必须具有三条或三条以上的腿。

(2) 从实现静态步态的可能性出发，步行机必须有四条或四条以上的腿。静态步态的稳定裕量将随着腿数的增加而增加，不过当腿数增加到七条以上时，稳定裕量的变化反而趋于平坦。

(3) 有可能提高步行机的步行速度。例如腿相对躯体摆动的平均速度为 V_m ，又步行机的腿数为 K ，那么步行机的运动速度 V_b 完全由 V_m 决定。

当 $K=4$ 时， $V_b=\frac{1}{3}V_m$ ；当 $K=5$ 时， $V_b=\frac{2}{3}V_m$ ；当 $K\geq 6$ 时，

$V_b=V_m$ 。当 $K\leq 5$ 时，为了使步行机达到最大运动速度，有必要采用动态步态。而四足步行机安全有按动态步态步行的功能。

(4) 即使采用目前最好的技术来制造步行机，由于电机系统的重量与其输出功率相比较，为此应将步行机的自由度限制到最少程度。这样，腿的数目也就应尽可能的少。

鉴于上述原因，在目前的技术条件下，考虑到控制系统的结构、电机驱动系统的效率等因素，采用静态步态远比动态步态来得实用。因而，在

我们的研究中决定设计一台具有静态步态的步行机，其腿数取为自由度最小的可能值四。另外，如果为了提高步行的行走速度而不得不引入动态步行时，四足步行系统调整为动态步态也很方便。在这一意义上，四足步行系统构成了静态步态和动态步态中的联接环节。因而，它可能具有良好的发展前景。

2. 步行机构型式的选择

在选择步行机构型式时，要考虑的因素有：运动空间的大小，传动链效率的高低，传动结构简单、轻巧，控制的简易程度，驱动功率的利用程度，以及步行机的灵活性等方面因素。下面我们从不同角度探讨应选择怎么样的步行机构最合理。

(1) 从机构结构简单，制造方便出发，应选用连杆机构为佳。因为连杆机构属于面接触的低副机构，如各构件间均采用转动副连接的话，那么制造方便，加工精度也能保证。

(2) 从传动功率的利用程度出发，应采用重力解耦式执行机构。这种执行机构在直角坐标系中的最基本形式如图1所示。它把腿的运动分解成推进方向和支撑重力方向两个相互垂直的方向的运动。即一个与重力方向相反支撑机体，另一个用于水平推进运动。当一个驱动器工作时，另一个就锁住不动，这样就能避免使驱动器处于反向工作状态，从而减少功率损失。满足这个解耦原理的较为典型的机构为缩放式机构。

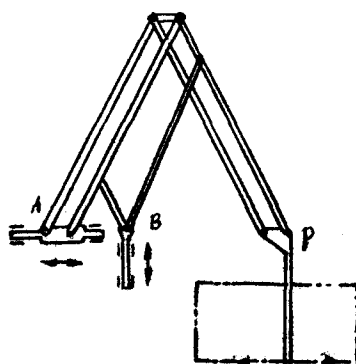
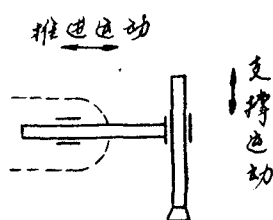


图1 最基本的重力解耦机构

图2 两自由度缩放式机构

(3) 从运动空间为最大出发，不宜采用只具有二自由度的缩放式机构。根据三个自由度设置情况，有如下几种形式：

a、圆柱坐标形式。座标为 (R, Z, θ) ，足端轨迹为一个环形空间。

这种形式按自由度设置位置不同分成二种，一种是在滑块点B处可沿R及Z方向运动，铰链A处绕轴旋转 θ ；另一种是在A处可绕A轴旋转 θ 和沿A轴移动Z，滑块B沿R方向运动。分别如图3(a)、3(b)所示。这两种圆柱坐标形式的缩放式机构，前一种适用于操作器，后一种适用于步行机构。因为在同样驱动力作用下，后一种形式较前一种形式所能支撑的重量更大些。

b、直角坐标形式。座标为(x、y、z)，足端轨迹应为一矩形空间（如图4所示）。

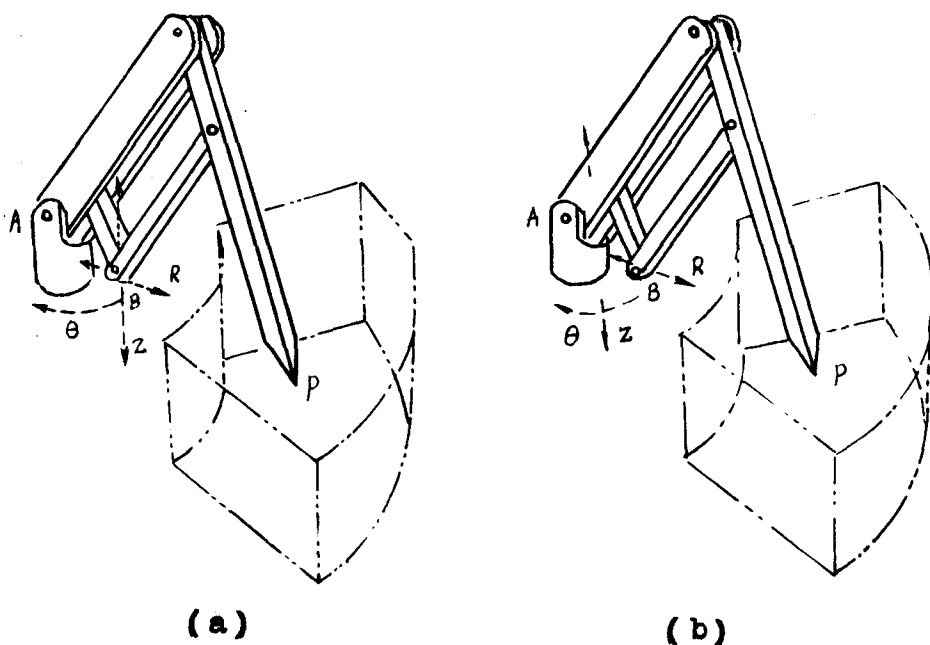


图3 圆柱坐标形式缩放式机构

(4) 考虑到步行机构传动轻巧性，在缩放式机构中以选取直角坐标形式的为佳。因为这种机构形式其传动系统可安置在机体中，腿的重量可减轻到最小，以保证腿跨步过程中的灵活性。

(5) 从实用工作空间最大来选择步行机构尺寸参数。所谓实用工作空间，也就是考虑

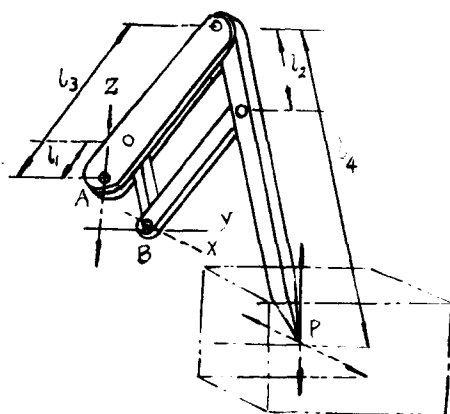


图4 直角坐标形式缩放式机构

机构力学特性时足的运动空间。此时，机构传动角应限制在允许范围之内。即

$$[\gamma_{min}] \leq \gamma \leq \pi - [\gamma_{min}]$$

由此，我们可给出当保证机构传动性能的前提下，足的实用工作空间为最大时的参数选择方法。这种方法将为机构各尺寸参数的选择，驱动器的行程和布置提供最优的参考数值。

综上所述，在我们设计中选用了三自由度直角坐标系缩放式机构作为研制JTUB-I型步行机的步行机构。其机构参数为 $l_1 = l_2 = 50$ 毫米， $l_3 = l_4 = 300$ 毫米，缩放比 $K = l_3 / l_1 = l_4 / l_2 = 6$ ，步行足的运动空间为 $480 \times 192 \times 200$ 毫米。

3. 步态的设计

步行机的步态是步行足几何设计的一个重要内容。一般先选择几种常用的步态作为设计的初始条件，使其稳定性裕量尽可能大，然后再根据另外一些步态要求来加以修正。这样，就产生了一个如何选择最初步态的问题。现在，国外的研究一般把波形步态作为最初选择的设计步态。这样选择的原因在于：(1)当占空系数 $\beta \geq 1/2$ 时，在所有的周期性步态中，波形步态具有最好的稳定性；(2)对波形步态的研究比较多，并且已经求得有关求稳定裕度的等式方程；(3)许多昆虫和哺乳动物在水平行走时均采用波形步态。因此，这种步行确实是可行的。

对于波形步态来说，步行机所能跨过沟的宽度为 $\frac{\lambda}{2}$ ，即 $\frac{R}{2\beta}$ 。速度应为 $\frac{R}{\beta T}$ 。对于四足步行机，其最小占空系数应为 $3/4$ ，能跨过沟的最大宽度应为 $\frac{2}{3}R$ ，最大速度为 $4R/3T$ 。可见，可以通过调节 R 和 T 来达到设计要求。

4. 腿安装型式的确定

把腿安装在机体上的方式是多种多样的。从能量角度把一条腿安装在机体上有两种优先方法。一种方法就是使腿的初始轴线垂直于机体的纵向轴线；另一种方法是使腿的初始轴线和机体的纵向轴线平行。只要选用重力解耦驱动系统，后一种安装方式的节能效果要比前一种安装方式好。国外的步行机一般都采用第二种安装方式。

从整体上来看，腿的安装方式可以分为昆虫类式和哺乳动物类式两种。一般来说，前一种安装方式要比后一种要好，其原因如下：(1)昆虫类式外形的腿可以设计得较长，这样能使机体的重心保持较低，以获得很好的稳定性。(2)较长的腿能使步行速度加快，而且能更适应崎岖的地面。(3)实际运动过程中与我们通常所推测的不同，昆虫类外形的腿，其能量消耗并不比哺乳动物类外形的腿多。

如果步行机机体不长，则四足步行机的四条腿可分别布置在躯体的前后两端。这样，就可以做到既使腿的初轴和躯体的纵轴平行，又可采用昆虫类式的外形。在我们设计中为了使步行机具有高度灵活性，腿既可实现昆虫类运动，又可实现哺乳类运动。

三、传动系统的设计

在步行机设计时应考虑的因素有：传动电机参数的选择，传动效率的估算，传动比的确定，传动系统型式的选取等。下面，我们对传动系统设计中几个主要问题作一论述。

1. 传动系统型式的选取

四足步行机的传动系统每一条腿是相互独立的，它们传动结构的型式又是一致的。所以，只要拟订出一条腿的传动系统就可以了。为了简化设计与制造，每一条腿三个自由度的传动系统也取成一个型式。鉴于这个考虑，我们拟定的传动系统如图5所示。A、B处的移动通过丝杠带动滑块

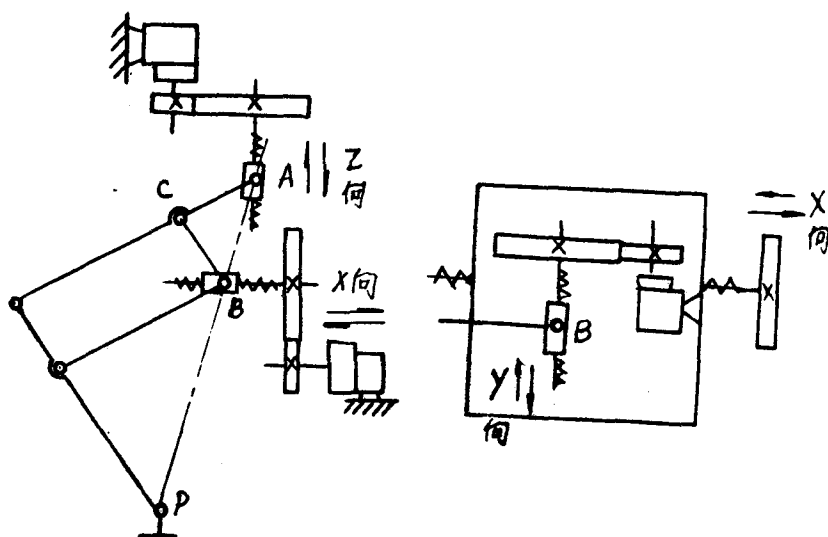


图5 传动系统简图

来实现。B处沿Y方向的移动迭加在沿X方向移动的滑块上。也就是B处沿X方向滑块移动时，Y方向的滑块一起移动，而B处Y方向滑块移动时，X方向的滑块不动。考虑到驱动电机的转速一般在3000转/分~5000转/分之间，所以必须加一级减速装置，其减速比大小取决于所选电机的

转速以及传动系统所需的输出力矩。为便于安装，减速装置与丝杠之间加一级传动齿轮，设计中加了一级圆柱直齿传动。这样，可使电机与丝杠呈平行轴线布置。当然，减速装置也可直接与丝杠连接，而省略中间一级传动齿轮。总体布置恰当的话，这样的传动系统型式应比图5所示的更紧凑些。

2. 驱动电机参数的选择

由于这是一台模型设计，所以一般以选电传动较简便。对驱动电机应具备以下要求：1) 可控性，2) 一定的灵敏度，3) 重量轻、功率大，4) 转速在3000~5000转/分范围之内为宜。根据这些要求，我们查阅了国内电机样本，最后选定上海仪表电机厂生产的直流伺服测速电机24S-CZ1作为步行机的驱动源。该电机主要技术参数为：

额定电压18伏，额定转矩60克·厘米，额定转速5000转/分，反电势常数2.5伏/1000转/分，转矩常数245克·厘米/安，外形尺寸 $\varnothing 24 \times 179$ 毫米。

根据额定转矩，估算出电机的额定功率约为3瓦。该电机基本符合上述提出的要求，但功率稍许小了些。

3. 传动比的确定

传动比的确定应从步行机移动速度，驱动电机功率以及步行足的重量和状况三方面综合加以考虑。如电机功率足够大，步行机完全可以达到设计速度。但是，在电机功率已经选定的前提下，要驱动一定重量的步行足，只能靠损失步行机运动速度来解决。步行机步行足相对机体的步长为210毫米，一步中机身相对地面移动70毫米。原定步行机设计速度为0.25公里/小时，但由于电机功率较小，传动效率较低，所以传动比从2.647改为25，随之步行机运动速度也从70毫米/秒下降为15毫米/秒左右。

4. 传动效率的估算

由于电机功率较小，所以在结构设计中总的原则采用轻型结构，以减轻步行机的自重。在各转动部分安装滚动轴承，传动丝杠采用2级精度，但由于螺旋升角较小，总的传动效率仍偏低，约0.7左右。

四、步行机结构设计特点

对于一个步行机来说，为了能承受的一定负荷，要求自重轻，因此应采用比重小的轻材料，结构应尽量简单。我们在设计中采用了铝合金门字