

## 四足机器人在直行和转弯下的步态规划研究

王丹 周德科 杨家琪

(沈阳建筑大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 针对四足机器人的直行和转弯运动,以爬行步态为基础,分别对其进行了步态规划。提出了协调旋转步态的概念并用于原地转弯中;找出直行步态与原地转弯步态的足端轨迹公共点,通过该点实现了步态的快速迁移并用于四足机器人的弯道转弯运动中;根据对四足机器人的结构设计,建立了四足机器人的虚拟样机;提出了一种新的评价准则——角度余量准则(SA准则),对规划的步态进行稳定性评价,从而找出最优步态。搭建实验平台进行了实验,结果显示,针对直行和转弯的步态规划合理、可行。

**关键词** 四足机器人 步态规划 步态迁移 协调旋转步态 角度余量准则

### Research on Gait Planning of Quadruped Robot in Straight and Turning

Wang Dan Zhou Deke Yang Jiaqi

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract** Aiming at the straight and turning movements of quadruped robots, the gait based on the crawling gait is separately planned. The concept of coordinated rotating gait is proposed and used it in in-situ turning. The common point of the foot trajectory of the straight gait and the turning gait on the spot is found, and then this point is used to realize the rapid migration of the gait and use it in the turning motion of the quadruped robot. According to the structure design of the quadruped robot in the early stage, a virtual prototype of a quadruped robot is established. A new evaluation criterion—angle margin criterion (SA criterion) is proposed to evaluate the stability of its planned gait, so as to find the optimal gait. A test platform is set up for testing, and the results showed that the gait planning for straight and turning is reasonable and feasible.

**Key words** Quadruped robot Gait planning Gait migration Coordinated rotation gait Angle margin criterion

## 0 引言

足式机器人作为移动机器人的重要组成部分,具有非连续地面支撑的运动特点,能够跨越崎岖复杂的地形,具备在非结构化、复杂环境中的应用潜力,近年来已经成为研究的热点。相对于双足机器人,四足机器人具有较好的稳定性;而相对于六足机器人,四足机器人的机构相对简单。因此,越来越多的学者投入到四足机器人领域的研究中。

从最早的 G. E 四足电控步行车和 Phoney<sup>[1]</sup>, 到近年来美国 Boston Dynamics 公司相继推出的 BigDog、WildCat、Spot<sup>[2]</sup> 四足机器人,几乎都是基于仿生技术的足式机器人,它们在复杂的、非结构化的环境中比轮式机器人具有更高的优越性。2019年, Boston

Dynamics 公司将其生产的 SpotMini 机械狗推向市场, SpotMini 因其超高的自适应性和仿生性能而被认为是目前最具代表性的四足机器人<sup>[3]</sup>。目前,国内最具代表性的四足机器人为 Laikago<sup>[4]</sup> 四足机器人,但它还无法做到像 SpotMini 那样具有高度的环境适应能力和控制性能。

决定四足机器人运动性能的主要因素为步态规划和运动控制研究,如何规划出有效的步态成为研究的重点和难点。Buchli 等<sup>[5]</sup>通过提出浮动基座逆动力学控制和预测力控制策略,实现了 little dog 在复杂路面的静步态稳定行走,但无法避免惯性的影响;孟健等<sup>[6]</sup>通过对机器人足端轨迹进行规划,实现了液压四足机器人在地面上的对角小跑步态,但由于采

用液压驱动，在机器人行走过程中，随着行走时间的增加，其精度会降低，没有电驱动的精度高；韩青等<sup>[7]</sup>通过构建正弦函数中枢神经振荡模型，实现了四足机器人稳定的节律直线、斜线和转弯3种步态的全方面运动控制，但由于中枢神经振荡模型不易于构建且其对硬件的要求比较高，不易实现；常青等<sup>[8]</sup>提出了一种基于参数化矩阵的运动规划方法，可实现四足机器人在平面上的转向和斜向运动；Kalakrishnan 等<sup>[9]</sup>基于零力矩点 (Zero moment point, ZMP) 并采用凸二次型规划方法同时生成 ZMP 轨迹与质心轨迹，实现了复杂地形的稳定通行；Zucker 等<sup>[10]</sup>采用协变哈密顿优化与运动规划算法进行质心轨迹以及摆动腿轨迹优化，实现了障碍翻越及高台阶攀爬；Gehring 等<sup>[11]</sup>采用串联弹性驱动器 (Serial elastic actuator, SEA)，提出虚拟力分配方法，实现 StarlETH 机器人的对角小跑步态以适应未知地形；张国腾等<sup>[12]</sup>采用虚拟模型控制 (Virtual modal control, VMC) 进行对角小跑步态控制，实现跨越不平整地形的仿真；Hardarson 提出了能量稳定裕度 (ESM)<sup>[13]</sup>，即将当前机器人势能与绕两支撑足构成的轴线刚性倾倒过程中的最大势能的差值作为稳定裕度的衡量准则。但上述方法都忽略了重心高度和干扰因素的影响。

为了使四足机器人能够在一些非结构化、复杂的环境下行走，本文中以爬行步态为基础，规划出适合该四足机器人的直线行走步态、原地转弯步态和弯道转弯步态，并且通过预先设定好 CFP 点<sup>[14]</sup><sup>16-17</sup> (直线行走步态与原地转弯步态的足端轨迹公共点) 的方式，使得该四足机器人能够实现这3种步态之间连续、平滑且快速的切换。为了能够简单且精准地评价其步态的稳定性，同时提出了一种基于距离与角度的四足机器人静态稳定裕度评价准则。

### 1 机器人结构

本文中基于  $G_F$  集理论设计了一种能够适应相对较复杂地形的四足机器人<sup>[15]</sup>，其虚拟样机如图 1 所示。该机器人单腿由 3 个部分组成，总共有 3 个关节，每个关节由 1 个舵机负责驱动，每条腿有 3 个自由度，可以实现直线行走和转弯运动。四足机器人主要参数如表 1 所示。

表 1 四足机器人主要参数

Tab. 1 Main parameters of quadruped robot

根关节舵机可控角度及扭力	180°/30 kg
膝关节舵机可控角度及扭力	180°/30 kg
踝关节舵机可控角度及扭力	180°/30 kg
足轮舵机可控角度及扭力	360°/30 kg

根关节舵机可控角度及扭力	180°/30 kg
底板长与宽及离地距离	390 mm×370 mm×138 mm
$L_1$	75 mm
$L_2$	80 mm
$L_3$	110 mm
$L_4$	176 mm
$L_5$	320 mm

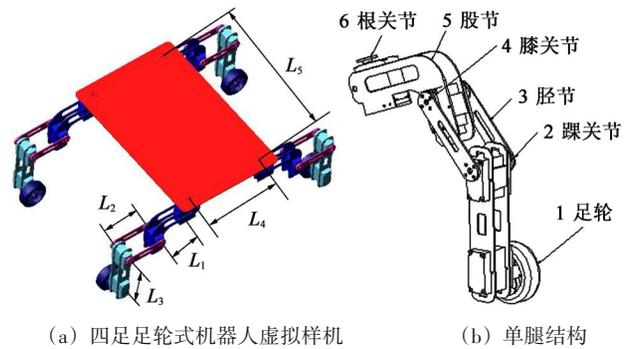


图 1 四足机器人结构图

Fig. 1 Quadruped robot structure diagram

### 2 四足机器人稳定性判据

为了准确评价四足机器人行走时的稳定性和稳定裕度，提出了一种简单而有效的判据，该方法可以用于静态稳定的评价，也可以用于部分对稳定性要求不高的动态稳定评价。机器人采用爬行步态时，每次行走都至少有 3 条腿作为支撑，当机器人出现不稳定现象要发生倾覆时，往往是绕着底板的对角线翻转。因此，如图 2(a) 所示，可以以机器人底板中心处线段  $AB$  与前进方向线的夹角  $\alpha$  来判断其稳定性

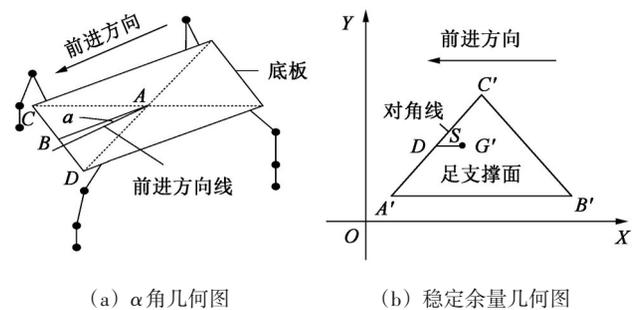


图 2 角度余量准则几何图

Fig. 2 Angle margin criterion geometry diagram

(若  $\alpha$  角在 1 个周期内变动范围不大，则机器人行走稳定)。其中，前进方向线为通过底板中心点  $A$  且沿着四足机器人前进方向上的线， $B$  点为线段  $CD$  的中点。机器人的重心在足支撑面上的垂直投影点沿着前进方向到对角线上的长度作为稳定余量 (稳定余量  $S$  越大，机器人抗干扰能力越强)。如图 2(b) 所示， $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$  为四足机器人的 3 个支撑足在水平面内的

投影点,  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 构成的平面为足支撑面,  $G'$ 为重心在足支撑面三角形内的投影点, 则  $DG'$  的长度为稳定余量  $S$ 。本文中将在上面的两个判断准则合称为角度余量准则(简称 SA 准则)。

### 3 四足机器人的步态规划

四足机器人在水平地面上的运动形式主要分为直线行走和转弯两种, 下面分别对其进行说明。

#### 3.1 直行步态的规划

四足机器人的行走主要模仿自然界的四足动物。根据其负载因子(单腿在地面支撑的时间和 4 条腿做 1 次周期循环时间的比值, 用  $\beta$  表示)的不同, 可以将四足机器人的运动步态分为: 奔驰步态( $\beta < 0.5$ )、蹄溜步态、对角步态( $0.5 \leq \beta < 0.75$ )和爬行步态( $\beta \geq 0.75$ )。四足机器人的步态稳定方式有两种, 一种是静态稳定( $\beta \geq 0.75$ ), 一种是动态稳定( $0 < \beta < 0.75$ )。由于静态稳定相比动态稳定具有较高的承载能力, 且不容易倾覆, 则本文中选择不稳定性较高的静步态。将机器人的 4 条腿分别命名为足 1、足 2、足 3、足 4, 如图 3 所示。该四足机器人的 4 条腿依次序各迈 1 次, 则有 24 种可能的步态次序, 去掉相似的步态, 则仅有 6 种基本步态。按照迈腿顺序, 基本步态分别是 4312、4231、4132、4213、4321 和 4123。

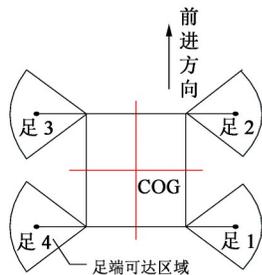


图 3 四足机器人俯视简化图

Fig. 3 Simplified top view of a quadruped robot

为了选择出四足机器人最优的迈腿顺序, 本文中采用 SA 准则分别求出这 6 种迈腿顺序中  $S_{max}$  的值, 然后根据  $S_{max}$  值的大小来选择最优的迈腿顺序。由文献[16]<sup>40</sup>可知, 根据四足机器人在摆动腿摆动时躯体移动与否, 可将四足机器人爬行步态分为间歇爬行步态(摆动腿摆动时躯体不移动)和协调爬行步态(摆动腿摆动时躯体移动), 由于协调爬行步态为四足移动机器人爬行步态的一般情况, 因此, 本文中在基于协调爬行步态的基础上来分别求出每种迈腿顺序下的  $S_{max}$  值。以迈腿顺序 4312 为例, 并参考文献[17]推导出计算  $S_{max}$  值的公式。

建立四足爬行步态几何图, 如图 4 所示。图 4 中,  $A$  为单腿步距, 指单腿从抬起到落地过程中, 机

体相对于地面移动的位移;  $L$  为支撑距, 指当 4 条腿都是支撑腿时, 机体相对于地面移动的位移。

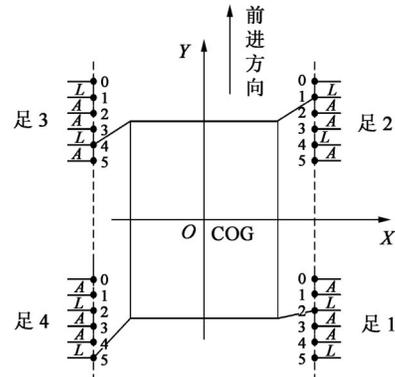


图 4 四足爬行步态几何图

Fig. 4 Geometry diagram of quadruped crawling gait

机器人移动步态规划如下:

第 1 步: 足 4 先抬腿从位置 5 移动到位置 0, 在足 4 抬腿的过程中, 其余 3 条腿做支撑并带动躯体移动距离  $A$ 。

第 2 步: 足 3 抬腿从位置 5 移动到位置 0, 并且躯体移动距离  $A$ 。

第 3 步: 4 条腿做支撑并带动躯体移动距离  $L$ 。

第 4 步: 足 1 抬腿从位置 5 移动到位置 0 且躯体移动距离  $A$ 。

第 5 步: 足 2 抬腿和前面做同样的运动, 躯体也向前移动同样的距离  $A$ 。

第 6 步: 4 条腿做支撑带动躯体移动距离  $L$ 。将上述过程列在爬行步态参数表中, 如表 2 所示。

表 2 爬行步态参数表

Tab. 2 Crawling gait parameter table

时间	$T/6$	$2T/6$	$3T/6$	$4T/6$	$5T/6$	$T$
腿 1 位置	3	4	5	0	1	2
腿 2 位置	2	3	4	5	0	1
腿 3 位置	5	0	1	2	3	4
腿 4 位置	0	1	2	3	4	5
躯体移动距离	$A$	$A$	$L$	$A$	$A$	$L$
支撑腿数	3	3	4	3	3	4

由表 2 可以得出关系式

$$\lambda = 4A + 2L \quad (1)$$

$$E = 3A + 2L \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为步距, 表示机器人躯体在 1 个周期中相对地面移动的距离;  $E$  为单腿相对跨距, 表示单腿从抬起到落地过程中, 足端相对于机体的位移。

由  $\lambda$ ,  $\beta$  和  $E$  的概念可以得出

$$E = \lambda\beta \quad (3)$$

为推导出  $S_{max}$  的求值公式, 必须找出  $S_{max}$  与上

面3个公式中一些参数的关系。由于在 $2T/6 \sim 3T/6$ 和 $5T/6 \sim T$ 之间为机器人四足着地进行重心调整的时间,调整后稳定余量达到最大,则可在周期为 $2T/6$ 到 $3T/6$ 之间建立其爬行步态几何图,如图5所示。

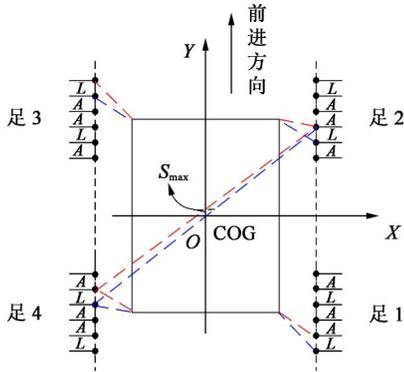


图5 在 $2T/6$ 到 $3T/6$ 之间的爬行步态几何图

Fig. 5 Geometry diagram of crawling gait between  $2T/6$  and  $3T/6$

由图5所示可得

$$L = 2S_{\max} \tag{4}$$

最后,由式(1)~式(4)可以得出

$$S_{\max} = \lambda(\beta - \frac{3}{4}) \tag{5}$$

用同样的方法,可以推出其他迈腿顺序所对应 $S_{\max}$ 的值,具体如表3所示。

表3 四足机器人迈腿顺序与对应的SA准则下的最大稳定余量表

Tab. 3 Four-legged robot's leg stepping sequence and the maximum stability margin table under the corresponding SA criterion

步态种类	迈腿顺序	最大稳定余量 $S_{\max}$
第1种	4312	$\lambda \times (\beta - 3/4)$
第2种	4231	$\lambda \times (3/2 \times \beta - 5/4)$
第3种	4132	$\lambda \times (3/2 \times \beta - 5/4)$
第4种	4213	$\lambda \times (\beta - 1)$
第5种	4321	$\lambda \times (\beta - 1)$
第6种	4123	$\lambda \times (\beta - 1)$

从表3所示可以看出,在协调爬行步态时,第1种迈腿顺序的稳定余量最大,剩下的几种迈腿顺序必须通过机器人一边行走一边调整自己的重心位置来达到稳定。由于间歇爬行步态与协调爬行步态之间的唯一不同是摆动腿摆动时躯体的移动与否,与几种迈腿顺序下其最大稳定余量之间的大小没有关系。因此,对于间歇爬行步态,其也是在第1种迈腿顺序下稳定余量最大。

由文献[16]<sup>40-45</sup>可知,间歇爬行步态具有更高的稳定性和更大的负载能力;而对于协调爬行步态,其具有更高的移动速度和更好的协调性,但其高的协调性是以牺牲稳定余量为代价来实现的。对在相

对复杂地面的四足机器人来说,对其稳定性要求更高,所以,选择间歇爬行步态且迈腿顺序为4312作为该四足机器人的行走步态。

根据表1中所示四足机器人腿部尺寸,取腿跨距 $E=100\text{ mm}$ ,对间歇爬行步态且迈腿顺序为4312的情况下的四足机器人样机进行步态规划。机器人在初始位姿时(图1),4条腿都与躯体呈 $90^\circ$ 分布。该四足机器人完成1个周期的运动可分为6步(图6)。第1步(图6(a)):  $Z_4$ 向前迈出 $100\text{ mm}$ ,其他3条腿做支撑,此时可以很容易地看出它的最小稳定余量为0;第2步(图6(b)):  $Z_3$ 向前迈出 $100\text{ mm}$ ,其他3条腿做支撑,此时可以看出它的最大稳定余量为 $E/2=50\text{ mm}$ (根据相似三角形得出);第3步(图6(c)): 4条腿都做支撑,机体前进 $50\text{ mm}$ ;第4步(图6(d)):  $Z_1$ 向前迈出 $100\text{ mm}$ ,其他3条腿做支撑;第5步(图6(e)):  $Z_2$ 向前迈出 $100\text{ mm}$ ,其他3条腿做支撑;第6步(图6(f)): 4条腿都做支撑,机体前进 $50\text{ mm}$ 回到初始状态。建立四足机器人的仿真模型,针对上述步态规划进行仿真,仿真过程如图7所示,其中,图7(a)为机器人的初始姿态,图7(b)~图7(g)分别为图6(a)~图6(f)对应的机器人仿真图。

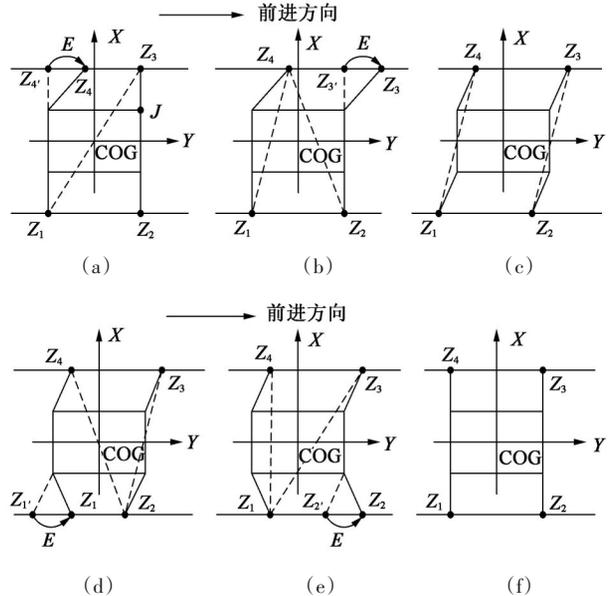


图6 四足机器人直线行走步态规划

Fig. 6 Gait planning of quadruped robot walking in straight line

将机器人底板中心在地面的投影点作为坐标原点,建立相对于地面静止的三维坐标系。其中, $Y$ 轴方向与机器人的前进方向平行, $Z$ 轴与地面垂直, $X$ 轴与 $Y$ 轴和 $Z$ 轴垂直,最后得到机器人在1个步态周期内,底板中心沿着前进方向的位移变化曲线,如图8所示。同时,测得在1个周期中,四足机器人的四足足端在 $Y$ 轴上的坐标值,如表4所示。

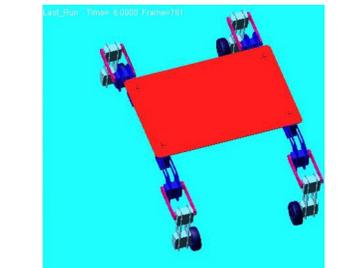
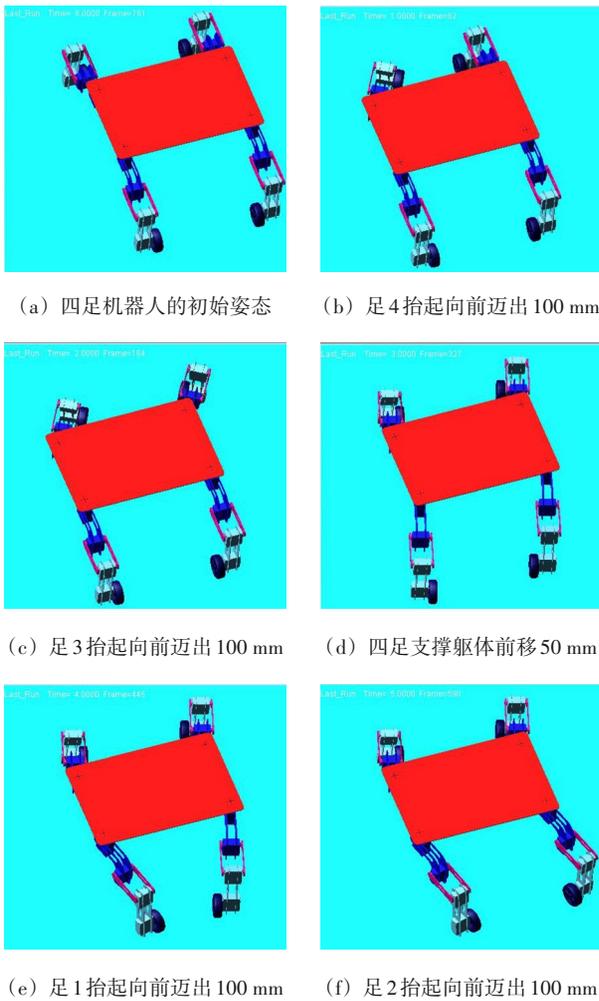


图 7 四足机器人直线行走步态仿真图  
Fig. 7 Gait simulation diagram of a quadruped robot walking in a straight line

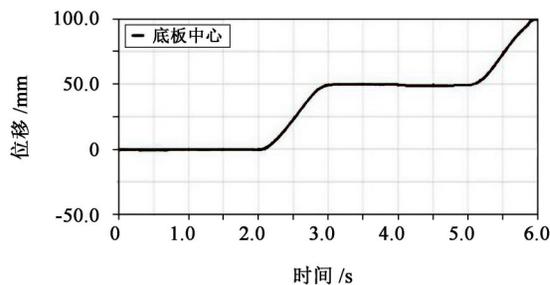


图 8 底板中心在 1 个周期的位移曲线  
Fig. 8 Displacement curve of the center of the bottom plate in a period

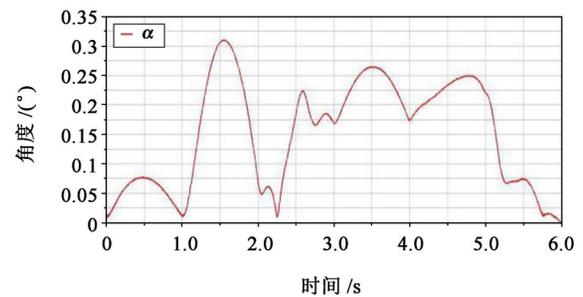
表 4 机器人四足足端在 1 个周期中的坐标变化

Tab. 4 Coordinate change of the quadruped end of the robot in a period

时间/s	足 1 在 Y 轴上的坐标/mm	足 2 在 Y 轴上的坐标/mm	足 3 在 Y 轴上的坐标/mm	足 4 在 Y 轴上的坐标/mm
0	-133	122	127	-128
1	-133	122	127	-28
2	-133	122	227	-28
3	-133	122	227	-28
4	-33	122	227	-28
5	-33	222	227	-28
6	-33	222	227	-28

从图 7 所示可以看出，该四足机器人在整个运动过程中，行走稳定且无干涉现象，并且在移动了 1 个周期以后又回到了初始状态。从图 8 中可以看出，该四足机器人分别在 2~3 s 和 5~6 s 之间向前移动了 50 mm，符合步态规划的要求。从表 4 中可以看出，四足都分别依次向前迈出了 100 mm，与步态规划一致。

为了进一步判断机器人的行走稳定性，运用 SA 准则并在 Adams 中测出  $\alpha$  角在 1 个步态规划周期中的变化规律，如图 9 所示。从图 9(a) 中可以看出，该  $\alpha$  角度值在 1 个周期中呈现上下起伏变化，曲线都在时间轴的上方，且该曲线值在 1 个周期内起于 0 且终于 0。从图 9(b) 中可以看出， $\alpha$  角最大值为  $0.3102^\circ$ ，则该四足机器人在整个周期中行走稳定。



(a)  $\alpha$  在 1 个周期中的变化图

X:	Y:	Slope:	Min:	Max:	Avg:	RMS:	# of Points:
2.448	0.1488	0.6596	2.3059E-014	0.3102	0.1487	0.1746	1226

(b)  $\alpha$  在 1 个周期中的关键点数值

图 9  $\alpha$  角度变化图及关键点数值

Fig. 9 Angle  $\alpha$  change graph and key point values

### 3.2 转弯步态的规划

四足机器人的转弯步态主要有原地转弯步态和弯道转弯步态两种。

#### 3.2.1 原地转弯步态规划

对于本文中的四足机器人，前述的间歇爬行步态主要适用于直线行走，也可以适用一些较小曲率的曲线运动。但对于原地转弯和大曲率弯道转弯运动，间

歇爬行步态并不适用，需要引入新的步态来实现。

由于旋转步态具有更高的稳定性和更快的旋转速度，且适用于大曲率的曲线运动。因此，本文中采用旋转步态来实现原地转弯。旋转步态根据其不同的旋转方向可以分为O-旋转(逆时针旋转)和RO-旋转(顺时针旋转)两种<sup>[14]12-14</sup>。

四足机器人要实现原地转弯，必须实现从间歇爬行步态到旋转步态和从旋转步态到间歇爬行步态的迁移。为了能够实现步态的快速稳定迁移，本文中引入CFP点，即爬行步态与旋转步态足端运动轨迹曲线的公共点。由CFP点的概念可知，在四足机器人中至少需要要有两条呈对角关系的腿落在CFP点上，才能实现步态的快速稳定迁移。由于图6(a)中足1、足2和足3的足端在CFP点上，图6(f)中四足足端都在CFP点上，则四足机器人在这两种状态下都可以实现从间歇爬行步态到旋转步态的快速稳定迁移。为了降低控制难度，选择在图6(f)中状态的基础上来实现步态的迁移。

为了提高原地转弯步态的适用性，旋转步态采用先移动四足再转动机体的形式。为了提高四足机器人在转弯过程中的稳定性，让机器人机体提前旋转以调整它的重心，把该类旋转步态命名为协调旋转步态。

如图10所示，该图描述了四足机器人从图6中爬行步态的(f)状态开始进行步态迁移的过程。具体过程如下：图10(a)为初始状态；第1步(图10(b))：足2开始抬腿并顺时针旋转10°，其余3条腿做支撑；第2步(图10(c))：足1抬腿并顺时针旋转10°，其余3条腿做支撑；第3步(图10(d))：足4抬腿旋转10°，其余3条腿做支撑；第4步(图10(e))：4条腿都做支撑带动机体顺时针旋转10°；第5步(图10(f))：足3顺时针旋转10°，四足机器人回到初始状态，为下一次的转弯或者爬行做准备。

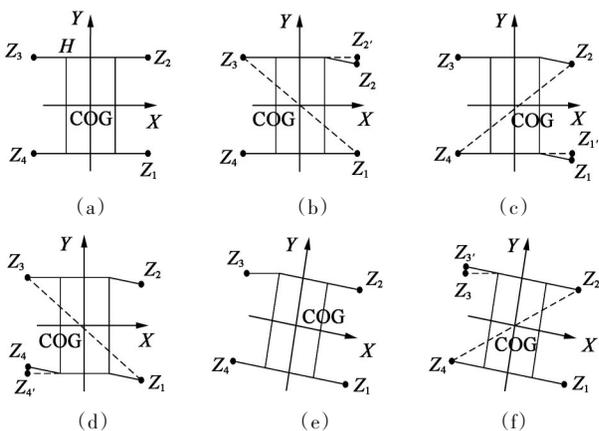


图10 基于RO-旋转的四足机器人原地转弯步态规划  
Fig. 10 In-situ turning gait planning of quadruped robot based on RO-rotation

建立四足机器人仿真模型，在其底板中心处建立坐标系，与图10中的坐标系一致且相对于地面静止，Z轴垂直于底板，四足机器人在1个转弯周期中的仿真过程如图11所示。

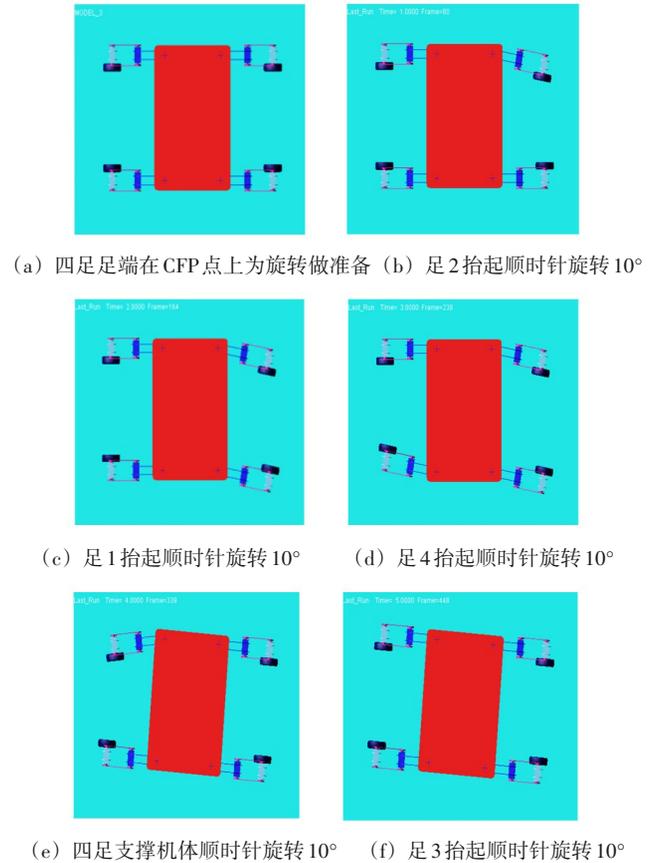


图11 基于RO-旋转的四足机器人原地转弯步态仿真  
Fig. 11 In-situ turning gait simulation of quadruped robot based on RO-rotation

测得机体在1个周期中绕着Z轴旋转的角度变化，如图12所示。令四足机器人的4条腿与底板的夹角分别为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 和 $\beta_4$ ，通过Adams仿真，分别得到了这4个夹角的变化曲线图，如图13所示。

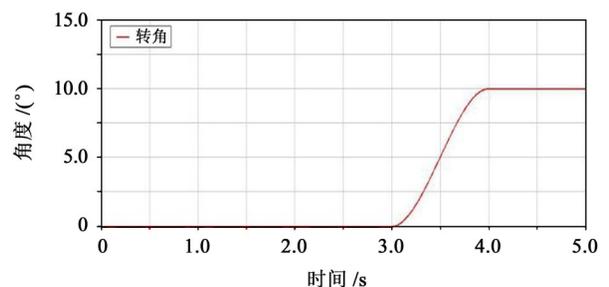
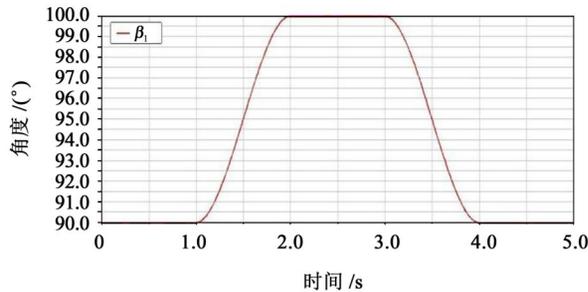


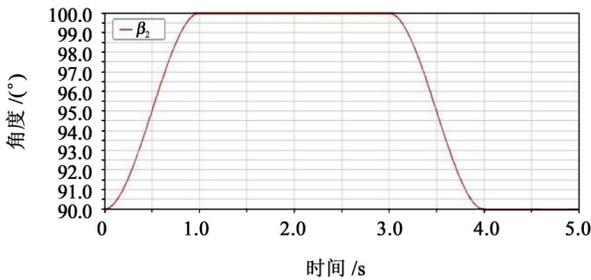
图12 机体转角变化图  
Fig. 12 Change of body rotation angle

由图10所示可以看出，采用协调旋转步态的机器人其初始位置的四足足端都在CFP点上且只用了5步就实现了预定的角度旋转，而传统的原地转弯步态需要先将四足机器人的足端移动到CFP点上才能进行原地转弯，其过程相对复杂且耗时。由图11所

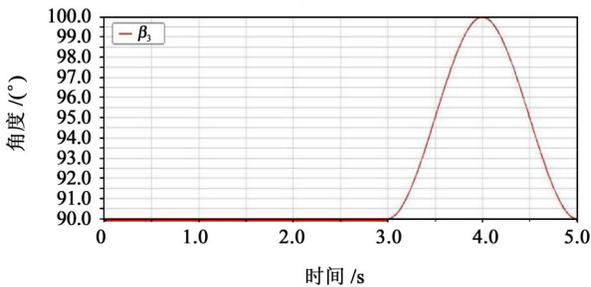
示可以看出，机器人转弯步态与图 10 中的一致，在整个转弯过程中比较稳定。由图 12 所示可以看出，机体在 3~4 s 时进行旋转，旋转角度为 10°，与步态规划一致。由图 13 所示可以看出，机器人 4 条腿的旋转顺序与图 10 中所示一致，则符合要求。



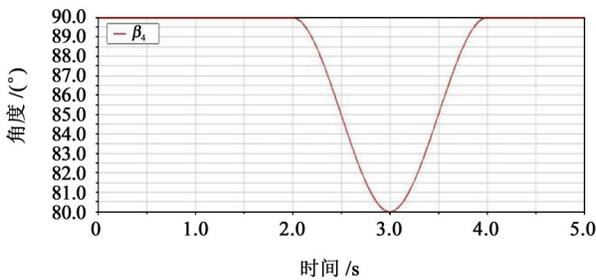
(a)  $\beta_1$  在 1 个周期中的变化图



(b)  $\beta_2$  在 1 个周期中的变化图



(c)  $\beta_3$  在 1 个周期中的变化图



(d)  $\beta_4$  在 1 个周期中的变化图

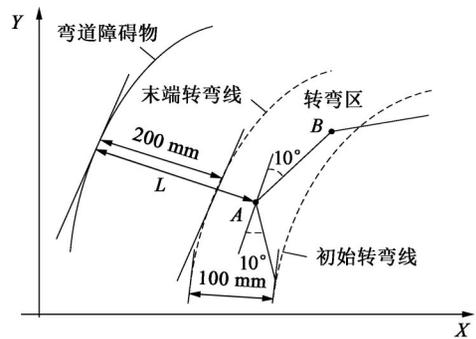
图 13  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  和  $\beta_4$  在 1 个周期中的变化曲线图

Fig. 13 Change curve of  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  and  $\beta_4$  in one period

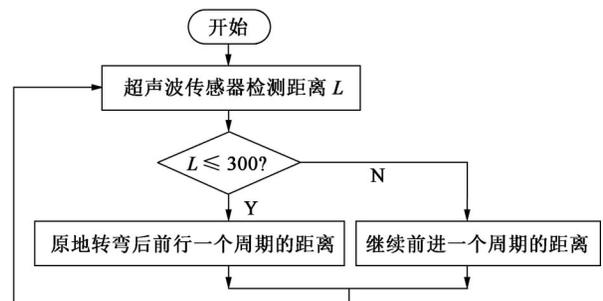
### 3.2.2 弯道转弯步态规划

为了使四足机器人实现简单、快速和高效的弯道转弯，采用直线行走步态与原地转弯步态结合来实现弯道转弯。为了避免四足机器人与弯道障碍物发生碰撞，根据机器人在 1 个步态周期中移动的距离，将末端转弯线与弯道障碍物的距离设成 200 mm，将初

始转弯线与末端转弯线的距离设成 100 mm，即它们之间的区域为转弯区，如图 14(a)所示。具体转弯过程如下：首先，当四足机器人完成 1 个步态周期的运动时，若超声波传感器检测到，沿着弯道障碍物的曲率半径方向到弯道障碍物的距离  $L < 300$  mm，则四足机器人进行原地转弯，否则继续前行，整个过程如图 14(b)所示。为了防止每次原地转弯的角度过大对路径规划造成影响，则令每次原地转弯的角度为 10°，由图 14(a)中可以看出，当四足机器人到达 A 点时，此时  $L < 300$  mm，符合转弯条件，则机器人进行原地转弯，然后继续前进，当到达 B 点后发现距离  $L$  仍然  $< 300$  mm，则机器人继续转弯并前进，直到  $L > 300$  mm 为止。具体的步态可参考图 6 和图 10 所示。



(a) 弯道转弯步态规划示意图



(b) 弯道转弯步态规划流程图

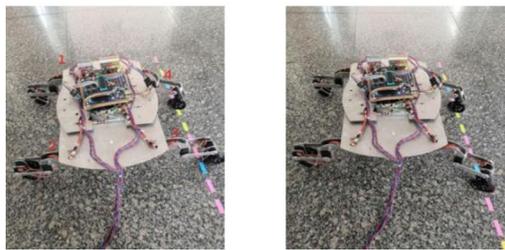
图 14 弯道转弯步态规划

Fig. 14 Turning gait planning

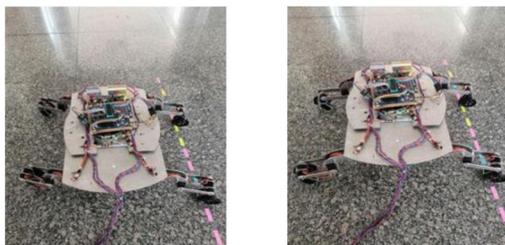
## 4 实验

为了验证步态规划的实用性，在四足机器人样机上展开了实验。该样机的每条腿有 3 个关节，每个关节由 1 个舵机驱动，使其能够完成直行和转弯运动。该样机由 51 单片机通过杜邦线与各个关节的舵机连接，通过输出 PWM 信号来控制舵机的转动。样机的一些基本参数如表 1 所示。图 15 所示为直线行走的实验过程，足 4 抬腿向前迈出 100 mm，其余 3 条腿做支撑，得到图 15(a)；足 3 抬腿向前迈出 100 mm，其余 3 条腿做支撑，得到图 15(b)；图 15(b)~图 15(c)

四足做支撑带动机体向前移动了 50 mm；足 1 与足 2 分别抬腿向前迈出 100 mm，得到图 15(d)；图 15(d)~图 15(e)四足做支撑带动机体向前移动了 50 mm，并且四足回到原点为下一次的直行或转弯做准备。四足机器人的整个运动过程稳定，无倾覆现象且与仿真结果一致。图 16 所示为四足机器人原地转弯实验图。图 16(a)所示为四足机器人的初始姿态；图 16(a)~图 16(b)所示为足 2 抬腿并顺时针旋转 10°；图 16(b)~图 16(c)所示为足 1 抬腿并顺时针旋转 10°；图 16(d)~图 16(e)四足支撑并带动底板原地旋转 10°；图 16(e)~图 16(f)，足 3 顺时针旋转 10°回到初始位置并为下一次的直行或转弯做准备。在整个转弯运动中，底板无倾斜且能够实现指定角度的原地转弯运动，与仿真结果一致。



(a) 足 4 抬起向前迈出 100 mm (b) 足 3 抬起向前迈出 100 mm



(c) 四足支撑躯体前移 50 mm (d) 足 1 与足 2 分别抬起向前迈出 100 mm



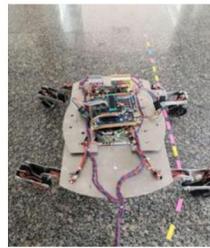
(e) 四足支撑躯体前移 50 mm

图 15 四足机器人直线行走实验

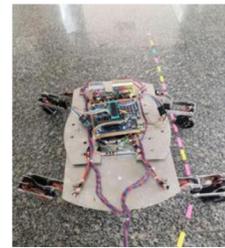
Fig. 15 Straight-line walking test of quadruped robot



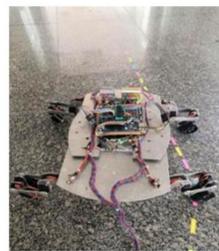
(a) 四足足端在 CFP 点上为旋转做准备 (b) 足 2 抬起顺时针旋转 10°



(c) 足 1 抬起顺时针旋转 10°



(d) 足 4 抬起顺时针旋转 10°



(e) 四足支撑机体顺时针旋转 10°



(f) 足 3 抬起顺时针旋转 10°

图 16 四足机器人原地转弯实验

Fig. 16 Quadruped robot in-situ turning test

### 5 结论

本文中提出了针对四足机器人行走稳定性判定的角度余量准则，且用该准则选出了步态为爬行步态时的最优迈腿顺序。同时，为四足机器人规划出了直线行走步态、原地转弯步态和弯道转弯步态。最后，将直线行走与原地转弯步态运用到实验样机上，验证了设计步态的可行性，为以后的驱动控制奠定了基础。

### 参 考 文 献

- [1] VUKOBRATOVIC M. Walking robot and power artificial limb [M]. Beijing: Science Press, 1988: 32-40.
- [2] 刘京运. 从 Big Dog 到 SpotMini: 波士顿动力四足机器人进化史 [J]. 机器人产业, 2018: 109-116.  
LIU Jingyun, From big dog to spotmini: evolutionary history of Boston dynamic quadruped robot [J]. The Robotics Industry, 2018: 109-116.
- [3] NIQUILLE S C. Regarding the rain of spotmini: or what a robot's struggle to learn reveals about the built environment [J]. Architectural Design, 2019, 89(1): 84-91.
- [4] UNITREE Robotics. Laikago robots [EB/OL] (2017-06-10). <https://www.unitree.com/products/laikago>.
- [5] BUCHLI J, KALAKRISHNAN M, MISTRY M, et al. Compliant quadruped locomotion over rough terrain [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 10-15, 2009, St. Louis, MO. New York: IEEE, 2009: 814-820.
- [6] 孟健, 李贻斌, 李彬. 四足机器人对角小跑步态全方位移动控制方法及其实现 [J]. 机器人, 2015, 37(1): 74-84.

- MENG Jian, LI Yibin, LI Bin. Quadruped robot diagonal trotting state omni-directional movement control method and its realization [J]. Robot, 2015, 37(1): 74-84.
- [7] 韩青, 叶选林, 曹飞祥, 等. 基于CPG的四足机器人全方位行走控制研究[J]. 机械传动, 2014, 38(5): 36-41.
- HAN Qing, YE Xuanlin, CAO Feixiang, et al. Research on omni-directional walking control of quadruped robot based on CPG [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(5): 36-41.
- [8] 常青, 韩宝玲, 罗庆生. 四足机器人转向与斜向运动规划理论与方法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(5): 477-480.
- CHANG Qing, HAN Baoling, LUO Qingsheng. The theory and method of quadruped robot steering and oblique motion planning [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(5): 477-480.
- [9] KALAKRISHNAN M, BUCHLI J, PASTOR P, et al. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain [J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 236-258.
- [10] ZUCKER M, RATLIFF N, STOLLE M, et al. Optimization and learning for rough terrain legged locomotion [J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(2): 175-191.
- [11] GEHRING C, COROS S, HUTTER M, et al. Control of dynamic gaits for a quadrupedal robot [C]//Proceeding of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE, 2013: 3287-3292.
- [12] 张国腾, 荣学文, 李贻斌, 等. 基于虚拟模型的四足机器人对角小跑步态控制方法[J]. 机器人, 2016, 38(1): 64-74.
- ZHANG Guoteng, RONG Xuewen, LI Yibin, et al. A quadruped robot diagonal trotting control method based on virtual model [J]. Robot, 2016, 38(1): 64-74.
- [13] HARDARSON F. Stability analysis and synthesis of statically balanced walking for quadruped robots [D]. Sweden: Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, 2002: 15-20.
- [14] 张文宇. 四足机器人斜面全方位静态步行及稳定性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 12-17.
- ZHANG Wenyu. The omni-directional static walking and stability analysis of quadruped robot on inclined plane [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 12-17.
- [15] 高峰, 杨加伦, 葛巧德. 并联机器人型综合的 $G_F$ 集理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 5-129.
- GAO Feng, YANG Jialun, GE Qiaode.  $G_F$  set theory of parallel robot type synthesis [M]. Beijing: Science Press, 2011: 5-129.
- [16] 王鹏飞. 四足机器人稳定行走规划及控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 40-45.
- WANG Pengfei. Research on stable walking planning and control technology of quadruped robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 40-45.
- [17] 张奔, 卞新高, 朱灯林. 四足机器人步态分析及仿真实现[J]. 图学学报, 2017, 38(5): 670-674.
- ZHANG Beng, BIAN Xin'gao, ZHU Denglin. Gait analysis and simulation implementation of quadruped robot [J]. Journal of Graphics, 2017, 38(5): 670-674.
- 
- 收稿日期: 2020-10-21 修回日期: 2020-12-06
- 作者简介: 王丹(1977—), 女, 满族, 辽宁新宾满族自治县人, 博士, 副教授; 研究方向为机器人相关技术。
- 
- (上接第46页)
- [18] 毕树生, 王守杰, 宗光华. 串并联微动机构的运动学分析[J]. 机器人, 1997(4): 259-264.
- BI Shusheng, WANG Shoujie, ZONG Guanghua. Kinematics analysis of series-parallel micro-motion mechanism [J]. Robot, 1997(4): 259-264.
- [19] 蒋俊香. 新一代串并联机床LINK SEXE 700工作机制分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(19): 70-72.
- JIANG Junxiang. Working principle analysis for a new generation of serial parallel machine tool LINK SEXE 700 [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(19): 70-72.
- [20] 杨廷力, 刘安心, 罗玉峰, 等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 47-56.
- YANG Tingli, LIU Anxin, LUO Yufeng, et al. Topological structure design of robot mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2012: 47-56.
- [21] 杨廷力, 刘安心, 沈惠平, 等. 基于方位特征方程的3T-1R并联机
- 构的拓扑结构综合[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 65-75.
- YANG Tingli, LIU Anxin, SHEN Huiping, et al. Topological structural synthesis of 3T-1R parallel mechanism based on POC equations [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 65-75.
- 
- 收稿日期: 2020-10-28
- 基金项目: 吉林省科技厅中青年科技创新领军人才及团队项目(20200301038RQ)  
2018年吉林省科技厅(20180201058GX)  
2018年吉林省发改委吉林省省级产业创新专项资金项目(2018C037-1)  
2018年长春市双十项目(18SS011)
- 作者简介: 张邦成(1972—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师; 主要从事复杂机电系统的故障诊断与预报。
- 通信作者: 姚禹(1984—), 女, 吉林长春人, 副教授; 主要从事串并联数控机床机电耦合机理分析。