DOI: 10.3901/JME.2020.19.191

一种新型可调整闭链多足机器人的设计与分析*

王 森 姚燕安 武建昀

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 针对单自由度闭链腿部机构足端轨迹单一导致机器人的地面适应性不足, 提出一种新型可调整闭链腿部机构。以 Klann 六杆机构为构型基础, 增加一个使其机架铰链转动的自由度, 实现了铰链位置的调整。用此方法获得足端轨迹的连续性变化, 从而可在纵向上提高抬腿高度以增强越障能力, 同时可在横向上改变跨步距以实现逼近目标点的规划, 并且还可通过切地角度的调节降低爬坡过渡段的足端冲击。此种腿部机构在行走时由一个电动机驱动, 可维持其单自由度特性, 在少驱动数目、高结构刚度以及大承载能力方面具有性能优势。进行腿部机构的构型设计、运动学分析以及以最大抬腿高度为目标的参数优化。在此基础上构建八足机器人, 建立足端轨迹簇并进行轨迹的参数分析, 开展行走策略的研究。制作一台样机, 针对典型地面环境开展适应性试验, 验证了设计的可行性。

关键词: 步行机器人; 可调机构; 足端轨迹; 行走策略; 机构分析

中图分类号: TH122; TP242

Design and Analysis of a Novel Adjustable Closed-chain Multi-legged Robot

WANG Sen YAO Yanan WU Jianxu

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044)

Abstract: The single foot trajectory of the single-degree-of-freedom close-chain leg mechanism leads to insufficient ground adaptability. Addressing this, a novel closed chain adjustable leg mechanism is proposed. Based on the six-bar Klann mechanism, one degree of freedom is added to realize the adjustment of the frame hinge position. By this way, the continuous change of foot trajectory can be obtained. The height of the legs can be increased longitudinally to enhance the obstacle crossing ability, and the stride distance can be changed in the transverse direction to achieve the plan of approaching the target point, and the slope-climbing impact can be reduced during the transition section as well. This kind of leg mechanism is driven by an electric motor while walking, which maintains its single-degree-of-freedom characteristics with fewer actuators, high structural stiffness and large carrying capacity. The configuration design, kinematics analysis and parameter optimization of the leg mechanism are carried out. Further the eight-legged robot is constructed. The foot trajectory cluster is established. The trajectory parameters and the walking strategies are analyzed and studied. The feasibility of the design is verified by fabricating a prototype and carrying out adaptability experiments in typical ground environment.

Key words: walking robot; adjustable mechanism; foot trajectory; walking strategy; mechanism analysis

0 前言

腿式移动相比于轮式和履带式有更好的地形适应性, 是因为腿式机器人足端以离散触地方式跨越障碍物或壕沟, 具有突出的灵活性和机动性。目前腿式机器人多从仿生学角度出发, 采用串联式的开链腿部机构, 例如: Bigdog^[1]、HyQ2Max^[2]、ANYmal^[3]

和 Cheetah^[4], 这些仿生构造的腿式机器人自由度高, 运动灵活, 具有很强的地形适应性, 然而大量的关节驱动增加了控制系统复杂度, 降低了腿部及机体的整体刚度。此外, 一些能够产生周期性足端轨迹的单自由度闭链连杆机构也可以用做腿部机构, 比如 Chebyshev 机构^[5]、Jansen 机构^[6-7]、Klann 机构^[8]等。由这类机构构成的腿式机器人具有少驱动数目、高结构刚度以及大负载的优势, 然而它们的步态固定, 足端轨迹单一, 限制了整机的地形适应性^[9]。

为发挥闭链腿式机器人^[10-11]的优点并提高其地

* 中央高校基本科研业务费重点资助项目(2019JBZ109)。20191010 收到初稿, 20200315 收到修改稿

形适应性, 需要增加必要的自由度来提升地形适应能力: NANSAI 等^[12]基于 Jansen 机构增加 4 个杆长调节自由度, 得到适应不同地形环境的足端轨迹; SHEBA 等^[13]基于 Klann 机构增加 5 个杆长调节和一个角度调节自由度, 得到 5 种类型的足端轨迹; FEDOROV 等^[14]在 Hoecken 机构和 Pantograph 机构结合构成的单自由度腿部机构上增加了一个被动自由度, 实现腿部贴合地面的自适应越障运动; ZHANG 等^[15]基于由凸轮和 Pantograph 机构构成的腿部机构增加两个可调整参数, 实现了两种足端轨迹配置和足端轨迹的俯仰以实现楼梯的攀爬; WU 等^[16]基于 Watt-I 型腿部机构增加一个杆长调节自由度, 实现越障能力的提升。闭链多足机器人单腿数量多, 增加调整自由度会带来调整驱动数量的大量增加。此外调整驱动布置在单腿的杆件上, 承力情况复杂, 且增加腿部质量。

面向提高闭链多足机器人的实用性能, 定位于少量调整电动机实现多足机器人的柔性调节, 提出在 Klann 机构上增加一个转动调整的自由度, 实现机架铰链位置调整, 以获得连续变化的足端轨迹。基于此种可调整闭链腿部机构设计一种新型八足机器人, 其整机只需要两个动力输入和四个调整输入, 可实现多样化地形的灵活适应。此外转动调节相比于线性调节具有驱动紧凑利于布置的优点, 并且调节位置在机架更有利于电动机布置于机架而不增加腿部质量, 同时相邻的双腿可共用调节输入有利于缩减调整电动机数量。对提出的可调整闭链腿部机构进行运动学分析和尺寸参数优化。对新型八足机器人进行足端轨迹分析和行走策略研究, 并通过实物样机开展路面适应性试验, 验证其可行性。

1 可调整闭链腿部机构

1.1 构型设计

可调机构^[17-18]的设计需要选择合适的调节驱动形式和调节参数。对比转动驱动和移动驱动在腿部机构的应用, 移动驱动具有推力大、直线运动精确性高等优点, 但在腿部机构应用过程中由于要布置电动机、减速器以及运动形式的转换机构等原因, 造成结构相对复杂、占用空间大及增加腿部重量等问题。而转动驱动则结构更加紧凑。调节参数的选择需要考量对生成足端轨迹的影响以及驱动布置位置对腿部质量的影响。

如图 1 所示 Klann 机构为单自由度六杆腿部机构, 包括机架杆件(ADE)、曲柄杆件(AB)、三副杆件(BCG)、二副杆件 1(DC)、二副杆件 2(EF)和步足杆

件(FGH), 由全转动副关节构成。单腿机构通过曲柄整周旋转带动其他杆件做周期性运动, 步足杆件足端 H 生成足端轨迹。通过参数调节发现更改 E 点的位置对抬腿高度有显著影响, 因此提出一种可调整闭链腿部机构。增加一个调整杆件(SE)到 E 点与新机架(ADS)之间, 形成一个具有主动调整功能的可调机构。所添加杆件布置到上述位置时, 相应的调整电动机可布置于机架而不增加腿部的质量。由图 1 可知, 该机构有 6 个活动构件, 8 个低副, 没有高副(即 $n=6$ 、 $P_L=8$ 、 $P_H=0$), 按式(1)可求得自由度为 2

$$F = 3n - 2P_L - P_H \quad (1)$$

图 1 构型简图

1.2 运动学分析

如图 1 所示, 在机架上建立坐标系 $O-XY$, 坐标系原点 O 设置在曲柄杆件与机架杆件的转动轴中心。基本杆组法适合对平面连杆机构的运动学分析。下面采用杆组法对机构进行运动学分析。该机构为全转动副机构, 可以拆分为单杆和 RRR 杆组。首先对单杆和 RRR 杆组进行运动学分析(包括位置分析、速度分析和加速度分析), 然后将机构拆分杆组并进行杆组法分析。

(1) 单杆(刚体上任一点)运动学分析(图 2)。

已知参数: 运动副 P_1 的运动参数及杆件几何参数 (x_1, y_1) , $(\dot{x}_1, \dot{y}_1)$, $(\ddot{x}_1, \ddot{y}_1)$, θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$, r 。

图 2 单杆运动分析

待求参数: 运动副 P_2 的运动参数 (x_2, y_2) , $(\dot{x}_2, \dot{y}_2)$, $(\ddot{x}_2, \ddot{y}_2)$ 。

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + r \cos \theta \\ y_2 = y_1 + r \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \dot{x}_1 - \dot{\theta} r \sin \theta \\ \dot{y}_2 = \dot{y}_1 + \dot{\theta} r \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = \ddot{x}_1 - \ddot{\theta}(y_2 - y_1) - \dot{\theta}^2(x_2 - x_1) \\ \ddot{y}_2 = \ddot{y}_1 + \ddot{\theta}(x_2 - x_1) - \dot{\theta}^2(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (4)$$

(2) RRR 杆组运动学分析。

已知参数: 外接运动副 P_1 、 P_2 的运动参数及两构件几何参数 (x_1, y_1) , $(\dot{x}_1, \dot{y}_1)$, $(\ddot{x}_1, \ddot{y}_1)$, (x_2, y_2) , $(\dot{x}_2, \dot{y}_2)$, $(\ddot{x}_2, \ddot{y}_2)$, r_1 , r_2 , M 。

待求参数: 内接运动副 P_3 的运动参数及两构件角运动参数 (x_3, y_3) , $(\dot{x}_3, \dot{y}_3)$, $(\ddot{x}_3, \ddot{y}_3)$, θ_1 , $\dot{\theta}_1$, $\ddot{\theta}_1$, θ_2 , $\dot{\theta}_2$, $\ddot{\theta}_2$ 。

图3 RRR 杆组运动分析

1) 求 θ_1 。

将杆组用封闭矢量三角形表示, 以 d 表示 P_1 到 P_2 的距离, 求得

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

φ 表示 P_1P_2 与水平方向的夹角, 求得

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (6)$$

α 表示 P_1P_3 与 P_1P_2 之间的夹角, 求得

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2r_1d}\right) \quad (7)$$

同一长度的 r_1 、 r_2 有两种装配模式。

θ_1 表示 P_1P_3 与水平方向之间的夹角, 求得

$$\theta_1 = \varphi \pm \alpha \quad (8)$$

在 Matlab 程序中, 用给定装配模式系数 M 的方法来确定式(8)中的正负号(图4)。

2) 求 (x_3, y_3) 和 θ_2 。

$$\begin{cases} x_3 = x_1 + r_1 \cos \theta_1 \\ y_3 = y_1 + r_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (9)$$

图4 装配模式

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}\right) \quad (10)$$

3) 求 $(\dot{x}_3, \dot{y}_3)$, $(\ddot{x}_3, \ddot{y}_3)$, $\dot{\theta}_1$, $\ddot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$, $\ddot{\theta}_2$ 。

由 P_3 点的位置方程和构件 1、2 的角位置方程对时间求导, 代入已知条件即可解出各运动参数。

(3) 杆组法分析。

按图5所示程序框图在 Matlab 中编程实现对该机构的运动学求解。

图5 杆组法分析流程图

1.3 尺寸参数优化

可调整闭链腿部机构在既有 Klann 机构尺寸^[19]上还需确定的参数包括: 新添加调整杆件 ES 的长度 l_{ES} 与新添加转动副 S 的位置。为了包含原有机构的轨迹, 需保证新机构调整杆调整过程中杆件末端要经过原 Klann 机构的 E 点。于是, 对新机构参数的设计转化为对 l_{ES} 和 θ_{ES} 的求取如图6所示。 θ_{ES} 为以 E 点为圆心调整杆与水平方向的夹角。

建立了以抬腿高度为最高的优化目标函数

$$\min f(x) = -\text{legheight}(\theta_s, l_{ES}, \theta_{ES}) \quad (11)$$

图6 机构参数设计

约束条件如下。

(1) 几何约束。

为保证二杆组 EFG 在曲柄 AB 整周转到时都能装配, 有如下约束条件

$$\begin{cases} \max \left\{ \sqrt{(X_{Ei} - X_{Gi})^2 + (Y_{Ei} - Y_{Gi})^2} \right\} - (l_5 + l_6) \leq 0 \\ |l_5 - l_6| - \min \left\{ \sqrt{(X_{Ei} - X_{Gi})^2 + (Y_{Ei} - Y_{Gi})^2} \right\} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$ 。 X_{Ei} , Y_{Ei} , X_{Gi} , Y_{Gi} 为曲柄 AB 整周转周期内 E 点和 G 点离散坐标值。

(2) 杆长和角度约束

$$\begin{cases} 0 \leq \theta_s \leq 359 \\ 10 \leq l_{ES} \leq 50 \\ 0 \leq \theta_{ES} \leq 359 \end{cases} \quad (13)$$

优化目标是抬腿高度关于调整杆角度 θ_s 和待定参数 l_{ES} 、 θ_{ES} 的函数。将上述优化目标函数和约束条件在 Matlab 中应用优化工具箱中的 `fmincon` 函数进行求解。在设定初始值 $\theta_s=270$ 、 $l_{ES}=40$ 、 $\theta_{ES}=180$, 优化结果为: $\theta_s=237.244$ 、 $l_{ES}=50.00$ 、 $\theta_{ES}=237.244$ 。发现在更改 l_{ES} 约束上限时, 其优化结果一直取上限值而其他结果不变, 表明 l_{ES} 与最大抬腿高呈正相关关系。但是调整杆件(SE)其力臂长度 l_{ES} 越大, 则调整驱动所需要扭矩也越大。所以在满足抬腿高度需求的情况下, 要尽量选择长度短的杆长。综合考量选取 $l_{ES}=45$ 、 $\theta_{ES}=237.244$ 的优化结果。最终完整的机构尺寸参数表如表 1 所示。

表1 机构尺寸参数表

类型	参数	数值	类型	参数	数值
杆长参数	l_1/mm	55	角度参数	l_{ES}/mm	45
	l_2/mm	100		$\alpha/(\circ)$	10
	l_3/mm	65		$\beta/(\circ)$	40
	l_4/mm	110	机架参数	A 点/mm	(0, 0)
	l_5/mm	120		D 点/mm	(-98.95, -21.44)
	l_6/mm	185		E 点/mm	(18.09, 128.73)
	l_7/mm	200		S 点/mm	(-6.26, 90.89)

2 可调整闭链多足机器人

可调整闭链多足机器人的结构布置如图 7 所示, 整机包含四个模块化双腿单元(图 7b)。双腿单元的两个曲柄和两个调整杆分别通过传动轴耦合在一起, 含有一个调整单元(图 7a)负责两个单腿的调整杆调节。每两个双腿单元又构成一四足模块(图 7c)。为缩减电动机数量, 四足模块的前后曲柄驱动轴通过链传动耦合在一起, 因此只需要一个动力电动机负责四个曲柄转动。四足模块采用前后双足同方向布置, 这样做是为了最大程度地发挥该机构的轨迹特点, 获得更好的越障能力。每个四足模块由一个大功率动力电动机驱动行走, 以及两个小功率调整电动机负责前后双腿单元的调整杆调节。整机(图 7d)由两个四足模块并排布置, 机架关联而构成双四足结构^[20]。应用传动机构合理缩减电动机数量, 集中动力输入和调节输入, 最终实现了多足机器人的高地形适应性和高效少动力。

图7 多足机器人的结构布置

单个四足模块中每个双足单元的曲柄相位差 180° , 前后双足同侧曲柄相位差 180° 。如此相位差设置, 使得单个四足模块按照对角步态行走。处于四足模块对角线上的腿进行同步运动, 对角支撑机器人前进^[20]。整机共有四个小功率调整电动机和两个大功率动力电动机, 实现了整机八足的行走运动和每条腿的主动调节。

3 足端轨迹分析

以运动学计算为基础, 并结合多足机器人结构开展足端轨迹分析。调整杆不同的角度对应着不同的足端轨迹。由于结构原因, 调整杆只能在特定角度范围内才可以产生封闭而无交叉的有效足端轨迹。设定调整杆角度 θ_s 的范围为 $-120^\circ \sim 45^\circ$ 。利用 Matlab 软件, 以固定间隔在该范围内取 θ_s 的值, 每隔 1° 绘制一次足端轨迹, 形成如图 8 所示的足端轨迹簇。该轨迹簇表征该机构的可选轨迹库。在面对不同路面环境时, 可选择合适的足端轨迹。轨迹簇中加粗轨迹为包含的 Klann 机构足端轨迹。

图 8 足端轨迹簇

足端轨迹能够充分体现步行机器人的运动能力, 包括抬腿高度, 跨步距等参数。足端轨迹按照运动状态可分为两种: 台架轨迹与行走轨迹^[21]。台架轨迹指机器人处于台架空转状态下, 一个周期内足端所绘制轨迹; 行走轨迹指机器人在平地行走时足端所绘制轨迹。以调整杆为 30° 时的足端轨迹进行具体分析说明如图 9、10 所示。其中图 10 中的两条曲线分别表示一个曲柄旋转周期内双腿单元左腿和右腿的足端行走轨迹。

台架轨迹与行走轨迹存在内在的联系。为展现这种联系并表述足端轨迹所展现的运动能力参数, 在此引入三组特征点如图 9、10 中所示。每组特征

点都含有两个点, 分别表示在同一时刻双腿单元的两个足端点位置(由于每个双腿单元曲柄相位差 180° 布置, 所以两个足端位置在轨迹图中体现为两个点始终追逐, 相差一定距离, 这段距离是由相位差所决定的)。三组特征点在两种轨迹中都是对应存在的。

图 9 台架轨迹

图 10 行走轨迹

换腿点: 两腿足端点在同一水平位置时的点, 两个点的水平方向距离为跨步距。

跨越点: 两腿足端点在同一铅直位置时的点, 在此后跨越相才可以有效包络障碍物(图 10 中阴影部分)实现跨越。

最大抬腿高度点: 存在一个最大抬腿高, 此时两腿足端垂直方向距离最大, 为该轨迹的最大抬腿高度。

由换腿点和最大抬腿高度点可以求得步行机器人在该足端轨迹下的两个重要参数: 跨步距和最大抬腿高度。步行运动过程中这两个参数十分重要, 变换每一步的跨步距可以调整与目标点的位置。如果只有特定的跨步距则与目标点位置只有特定的离散距离值, 无法很好地逼近目标点。最大抬腿高度表征足式机器人跨越障碍物的能力。以往的单自由度腿式连杆机构只有固定的足端轨迹无法调整跨步距, 同时为了追求运动过程的平稳性, 在优化过程中一般会牺牲抬腿高度, 所以越障能力普遍不足。提出的可调整闭链腿部机构, 其足端轨迹可以在两个方向上做线性调节, 即在纵向上提高最大抬腿高度, 在横向上改变跨步距。如图 11 所示, 可以看到在抬腿高度增加时跨步距减小, 抬腿高度减小时跨步距增加。

图11 调整杆角度与跨步距、最大抬腿高度关系图

4 行走策略分析

4.1 目标点逼近策略

由于单自由度闭链腿机构构成的步行平台只有单一的足端轨迹，当其直线行走时落足点是一系列的离散点。若有一目标点，机器人就不能主动将落足点逼近到这一目标点。在跨越障碍物或者壕沟时，落足点与障碍物或壕沟边缘的距离是重要的参数。越障时距离不合适会导致跨越行为的失败，因此步行机器人需要具备控制落足点位置的能力。所设计的机械腿具备一定的跨步距调整能力，由图11所示跨步距可以在158~286 mm内做连续调节。通过跨步距的调节可以调整落足点的位置。图12展示了落足点的范围，其中深色部分为落足范围。如果有目标点落在这些范围，机器人就可以通过调整跨步距逼近目标点位。

图12 落足范围

如图13给出了机器人前侧支撑腿落足位置逼近目标点位置的策略。设定前侧支撑腿起始位置与目标点距离为 L ， θ_s 为调整杆设定值， λ 为跨步距。图中涉及到了两个函数

$$\theta_s = f(\lambda) \quad (14)$$

$$\lambda = \varphi(\theta_s) \quad (15)$$

式(14)和式(15)由图11中跨步距 λ 与调整杆角度 θ_s 的数据通过多项式拟合而得到

$$\theta_s = 8.801 \times 10^{-9} \lambda^5 - 9.687 \times 10^{-6} \lambda^4 + 0.00427 \lambda^3 - 0.9428 \lambda^2 + 105.2 \lambda - 4876 \quad (16)$$

$$\lambda = -0.00005437 \theta_s^3 - 0.008353 \theta_s^2 + 0.7476 \theta_s + 274.7 \quad (17)$$

图13 目标点逼近策略

图13的策略执行过程中，机器人在计算得到调整杆角度后由调整输入驱动调整杆运动，此过程动力输入停止，待调整杆到达指定位置后再执行前进或后退动作，由动力输入驱动行走。

例如在执行通过壕沟动作时，第一步需要将支撑腿落足点尽量靠近壕沟边缘，执行目标点逼近策略，在足端到达壕沟边缘后，再执行跨越动作。跨越过程如图14所示。

图14 过壕沟过程

4.2 越障策略

障碍物形态多样，在这里取典型的垂直墙障碍物作为越障对象进行研究。越障时足端行走轨迹曲

线如图 15 所示, 以支撑腿所在位置 O 为坐标原点构建平面直角坐标系。

图 15 越障轨迹

$P(x_p, y_p)$ 为跨越腿运行到垂直墙边缘正上方时的位置, x_p 表示支撑腿到垂直墙的距离, 定义 P 与 Q 点的距离为越障裕度 S 。机器人足端能够成功跨上障碍物的充分必要条件为越障裕度 $S > 0$, 但一般为了提高其越障成功率 S 越大越好。

$$S = f(x_p) - H \quad (18)$$

式(18)中 $f(x)$ 是越障时足端行走轨迹曲线的函数表达式, 由运动学分析得到。如图 16 所示为一组运动学分析所得到的不同调整杆角度下的足端行走轨迹。越障裕度是关于支撑腿与垂直墙距离 x_p 的函数。某一特定的足端行走轨迹下(最大抬腿高度大于 H), 在面对一个确定高度 H 的垂直墙障碍物时, 存在一个最大越障裕度 $S_{\max}$, 且对应着一个支撑腿与垂直墙距离 x_p 。

图 16 不同调整杆角度下的行走轨迹图

综合分析, 在面对垂直墙障碍物时, 需要根据最大抬腿高度选择最大越障裕度为设定裕度时的足端行走轨迹, 并确定该轨迹在最大越障裕度位置时对应的支撑腿与垂直墙距离 x_p , 再将其设定为越障起步距离。以设定的起步距离调整支撑腿到垂直墙的距离后, 由调整输入驱动调整杆到达指定角度, 再由动力输入驱动机器人执行越障动作, 完成越障。

4.3 爬坡策略

步行机器人在爬坡时, 在由平地向斜坡过渡的阶段, 足端轨迹的切地角度 α (足端落地时轨迹方向与水平方向的夹角) 会对爬坡过程产生显著的影响, 如图 17 所示。

图 17 不同足端轨迹的爬坡

将足端与坡面接触时, 沿足端轨迹切线的反作用力 f 在水平和垂直方向分解为 F_x 和 F_y 。 α 的大小对作用力 F_x 和 F_y 有显著影响, α 增大时, F_x 会减小而 F_y 会增大。通过改变调整杆角度, 可以变化足端轨迹形态来增大切地角度, 从而减小向后的冲击力, 增大垂直向上的作用力, 进而改善爬坡时的受力情况, 使机器人在面对大角度坡面时能够更好地形成抬升运动, 减少冲撞, 提高爬坡能力。

5 样机试验

建立了样机的三维模型, 完成对电动机、减速器、链条、轴承、电池、控制器件等零部件的选型工作, 绘制零件工程图, 加工装配得到如图 18 所示的八足机器人试验样机。它包含机器人本体、控制系统、电池以及步进电动机驱动器。操作者可通过遥控器控制样机的前进、后退、转向以及调整杆角度调节。样机的主要参数如表 2 所示。

表 2 样机参数表

参数	数值	参数	数值
质量/kg	42	主要材料	铝合金
长×宽×高 (mm×mm×mm)	1 000×730×480	工作电压/V	24
动力电动机	Maxon RE40	动力扭矩 (N·m)	40
调整电动机	三洋 103H7823-0740	调整扭矩 (N·m)	8.8
控制板	Arduino Mega2560	遥控器	WFT06X-A

图 18 试验样机

对样机开展路面适应性试验。如图 19 所示为原地转向试验。机器人的左右四足反方向行走, 整

机进行差速转向。该试验过程中平均转向速度为 $24^\circ/\text{s}$ 。试验过程发现机器人在原地转向时会有远离转向中心的偏移,降低转向速度可以减小偏移量。

图19 原地转向试验

如图20所示为攀爬垂直墙试验。应用越障策略设定起步距离和调整杆角度。遥控操作调整杆到达设定角度,启动动力电动机驱动机器人前进,成功跨上200 mm垂直墙。

图20 垂直墙试验

如图21所示为 22° 纵坡攀爬和侧坡行走试验。纵坡攀爬发现整机质心布置靠前有利于爬坡过程。

图21 爬斜坡试验

如图22所示为碎石路面和草地路面行走试验,行走过程平稳。

图22 行走试验

6 结论

(1) 提出一种可调整闭链腿部机构。该机构相较于传统闭链机构在机架位置增加一个主动调整自由度以实现机构调整,在保证原有闭链腿部机构特性基础上显著提升地形适应性。

(2) 对可整调闭链腿部机构进行构型创新设计,利用杆组法进行运动学分析并完成机构尺寸参数优化,最终得到了可连续变化的足端轨迹簇。

(3) 构造了两动力驱动、四调整驱动的新型八足机器人。对台架轨迹与行走轨迹进行分析,根据提出的三组特征点建立了两者的转化关系。进行了行走策略分析,提出逼近目标点位置策略、越障策略以及爬坡策略。

(4) 制作样机一台,开展典型路面适应性试验,试验表明该构型构成的多足机器人具备良好的越障性和通过性,验证了设计可行性。

参考文献

- [1] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the rough-terrain quadruped robot[C]// Proceedings of the 17th International Federation of Automatic Control Congress, July 6-11, Seoul, Korea. IFAC, 2008: 10822-10825.
- [2] SEMINI C, BARASUOL V, GOLDSMITH J, et al. Design of the hydraulically actuated, torque-controlled quadruped robot HyQ2Max[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(2): 635-646.
- [3] HUTTER M, GEHRING C, JUD D, et al. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 9-14, Daejeon, South Korea. New York: IEEE, 2016: 38-44.
- [4] SEOK S, WANG A, CHUAH M Y, et al. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot[C]// 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE, 2013: 3307-3312.
- [5] LIANG C, CECCARELLI M, TAKEDA Y. Operation analysis of a Chebyshev-Pantograph leg mechanism for a single DOF biped robot[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2012, 7(4): 357-370.
- [6] NANSAI S, ELARA M R, IWASE M. Dynamic analysis

- and modeling of Jansen mechanism[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 64: 1562-1571.
- [7] 臧红彬, 沈连娣. TheoJansen 仿生腿研究及其机构优化设计[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(15): 101-109.
- ZANG Hongbin, SHEN Lianwan. Research on bionic legs of theojansen and its optimized design[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(15): 101-109.
- [8] LOKHANDE N G, EMCHE V B. Mechanical spider by using Klann mechanism[J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications*, 2013, 1(5): 13-16.
- [9] RAIBERT M. Legged robots that balance[M]. The MIT Press, 1986.
- [10] LIU Changhuan, YAO Yanan, TIAN Yaobin. Biped robot with triangle configuration[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(1): 20-28.
- [11] XI Da, GAO Feng. Type synthesis of walking robot legs[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(1): 15.
- [12] NANSAI S, ROJAS N, ELARA M R, et al. On a Jansen leg with multiple gait patterns for reconfigurable walking platforms[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(3): 1-18.
- [13] SHEBA J K, ELARA M R, MARTÍNEZ-GARCÍA E, et al. Synthesizing reconfigurable foot traces using a Klann mechanism[J]. *Robotica*, 2017, 35(1): 189-205.
- [14] FEDOROV D, BIRGLEN L. Design of a self-adaptive robotic leg using a triggered compliant element[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(3): 1444-1451.
- [15] ZHANG Yang, ARAKELIAN V, LEBARON J P. Design of a legged walking robot with adjustable parameters[M]. *Advances in Mechanism Design II*. Springer, Cham, 2017: 65-71.
- [16] WU Jianxu, YAO Yanan, LI Yibin, et al. Design and analysis of a sixteen-legged vehicle with reconfigurable close-chain leg mechanisms[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2019, 11(5): 1-31.
- [17] MCGOVERN J F, SANDOR G N. Kinematic synthesis of adjustable mechanisms—Part 2: Path generation[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1973, 95(2): 324-330.
- [18] 周洪, 邹慧君. 可调节型曲柄摇杆连续轨迹生成机构的优化综合[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(11): 19-22.
- ZHOU Hong, ZOU Huijun. Optimization and synthesis of adjustable crank rocker continuous trajectory generation mechanism[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 36(11): 19-22.
- [19] KIM H G, JUNG M S, SHIN J K, et al. Optimal design of Klann-linkage based walking mechanism for amphibious locomotion on water and ground[J]. *Journal of Institute of Control Robotics and Systems*, 2014, 20(9): 936-941.
- [20] 张伟涛. 双四足差动驱动步行车辆的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- ZHANG Weitao. Research on double quadruped differential driven pedestrian vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2012.
- [21] WU Jianxu, YAO Yanan, RUAN Qiang, et al. Design and optimization of a dual quadruped vehicle based on whole close-chain mechanism[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(19): 3601-3613.

作者简介: 王森, 男, 1995 年出生。主要研究方向为机构与机器人学。
E-mail: 17121307@bjtu.edu.cn

姚燕安, 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: yayao@bjtu.edu.cn

武建响(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士后。主要研究方向为机构与机器人学。

E-mail: 13116343@bjtu.edu.cn