DOI: 10.3901/JME.2019.15.145

新型轮腿复合机器人的运动分析及步态研究*

张程煜 郭 盛 赵福群

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044)

摘要: 为提高机器人在复杂环境下执行多种任务的能力,提出了一种通过轮式与足式相互切换实现多种操作模式的新型轮腿复合机器人,给出了机器人初始运动模式以及通过支链变换可实现的其他移动和操作模式。求解了机器人六足和四足行走模式下的运动学与步态问题,根据稳定性几何约束条件,给出了机器人支链末端的可达工作空间与移动过程中的运动轨迹。利用机器人轮式行走状态下全向模式和低重心模式的支链几何关系,给出了两种模式相对应的支链位姿与机器人行走参数。最后,考虑机器人所处不同地形和任务环境,对机器人不同模式间的切换过程进行了运动规划与稳定裕度计算,并在 V-REP 机器人仿真平台进行虚拟样机仿真。结果证明机器人在运动与模式切换过程中具有良好的稳定性,以及实现多种类型任务的移动和操作能力。

关键词: 多操作模式; 轮腿复合机器人; 运动学; 步态规划; 稳定性

中图分类号: TG156

Motion Analysis and Gait Research of a New Wheel-legged Compound Robot

ZHANG Chengyu GUO Sheng ZHAO Fuqun

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

Abstract: In order to improve the ability of the robot to perform multiple tasks in the complex environment, a new wheel-legged compound robot which can realize multiple operation modes by switching between wheel and foot is proposed. The initial movement mode of the robot and other movement and operation modes which can be realized by limbs transformation are given. The kinematics and gait of the robot with six and four legged walking modes are solved. According to the geometrical constraints of stability, the accessible workspace of the robot's limb and the motion trajectory in the moving process are given. Based on the geometrical constraints of the omnidirectional mode and the low center of gravity mode, the position and posture of the branched-chain corresponding to the two modes and the walking parameters of the robot are given. Finally, considering the different terrain and task environment, the switching process between different modes of the robot is carried out with motion planning and stability margin calculation, and the virtual prototype simulation is carried out on V-REP. The results show that the robot has good stability in the process of movement and mode switching, as well as the ability to move and operate multiple types of tasks.

Key words: multi-operation mode; wheel-leg compound robot; kinematics; gait research; stability

0 前言

轮腿复合式机器人^[1-3]能够在轮式移动与腿足式移动模式间切换,同时具备轮式机器人的快速移动能力和腿足式机器人的越障能力,相较于轮式机器人或腿足式机器人,其优异的移动性能使其能适应复杂地形,从而能更好地应对危险环境的救援、深空领域的探测等非结构复杂环境下的操作任务,因此对轮腿式复合机器人的研究具有重要的意义,也吸引了越来越多学者的关注。

国内外许多学者与研究机构提出了多种轮腿式机器人机构,美国宇航局研发的 ATHLETE 机器人^[4]具有轮式与腿式移动能力,并且具有较大的负载能力;德国研制的 ALDURO 与日本研制的 Roller 均具有良好的移动能力与地面适应能力;丁希仑等^[2,5]先后提出了多种轮腿式机器人方案,并对其运动学及构态变形方式进行了研究。徐坤等^[6]提出了一种圆周对称的六轮腿式机器人,并对其步行模式与轮行模式下的步态进行了研究。但目前已经研制出的轮腿式复合机器人大多数仅具备移动能力,不具备通过机器人自协作完成复杂操作任务的能力。

为解决移动机器人操作能力不足的问题,ARAI 等^[7-8]提出了具移动和操作能力多支链机器人的概

* 国家自然科学基金(51875033)和北京市自然科学基金(L172021)资助项目。20181016 收到初稿,20190320 收到修改稿

念,并给出了设计思路与应用领域,同时 ARAI 等^[9]对具移动与操作能力机器人运动学进行了推导并给出了数值算例,但其并未提出具体的机器人构型。KOYACHI 等^[10-11]提出了可切换操作与移动支链的机器人 MELMANTIS,并对机器人的控制方法进行了试验研究^[12]。DING 等^[13]提出了 NOROS-III 六足机器人,并对其腿部支链进行操作的控制方法进行了试验研究,进一步证明了腿部支链与手部支链切换操作与控制实现的可行性。稳定性是同时具移动和操作能力机器人的一项重要性能指标,YONEDA 等^[14]提出了机器人在不平坦地面上的稳定性计算方法,在此基础上,ZHOU 等^[15]提出了 LSM 方法判断稳定性,并给出了特定步态下的数值算例。

综上所述,具有移动与操作能力的多模式机器人研究已经取得了一定进展,但是对该类机器人机构的创新设计与不同模式下的步态分析尚显不足,而对不同模式的步态以及模式切换过程中的运动学分析,是该类机器人设计与分析中需要考虑的首要问题。本文提出了一种具有多种操作模式的新型轮腿复合式机器人,其支链可以作为腿部支撑支链进行行走移动,也可以作为手臂操作支链,通过支链的协作配合完成不同任务的操作,从而机器人同时具备移动和操作等多种工作模式。建立机器人的整体运动学模型,对机器人不同步态下的运动学问题进行分析。以工作中面临的典型操作环境为背景,对机器人模式切换过程进行分析,并在 V-REP 机器人仿真平台实现模式切换过程的仿真,结果证明其能够在轮式与腿式模式间切换,以适应不同的地形环境与操作任务。

1 机器人结构与工作模式设定

图 1 所示为多操作模式新型轮腿复合机器人的结构示意图,机器人由 6 条支链与动平台构成,每条支链布置有 3 个转动关节与 1 个具有动力的主动轮,每个转动关节均为驱动关节;6 条支链呈对称布置,动平台为正六边形结构。

图 1 机器人结构示意图

为使得机器人操作和移动时,支链具有更好的灵活性,将机器人车身平台侧板设计为可转动式,如图 2 所示,具有 90° 和 135° 两种位置,相应的车身侧板角度 β 分别为 $\beta = -90^\circ$ 和 $\beta = -45^\circ$ 。

图 2 侧板 90° 与 135° 位置

支链可以作为腿部支撑支链,也可以作为手臂操作支链,通过支链的切换,机器人同时具备移动能力和操作能力,并且具有多种操作模式。定义图 1 所示的机器人状态为基础运动模式,即六足运动模式,在多数环境下,机器人采用基础模式行走。

此外,根据机器人的支链变换与相互配合形式,定义机器人的两类工作模式:机器人自协作模式与机器人移动模式,具体分为四种,分别为双臂与四足协调操作模式,如图 3a 所示,两条支链作为手臂支链,四条支链作为腿部支链,四足平台作为可调整姿态的支撑平台,与双臂协调操作完成自协作操作任务,可以应用于危险区域(或人为不可达区域)的装卸、拆除、焊接、折弯等;三足支撑多臂协作模式,如图 3b 所示,三条支链作为手臂支链,另外三条作为腿部支链,可以作为固定操作、维修平台,利用多臂协作完成目标物体的打磨、维修等操作任务。

图 3 机器人自协作模式

另一类模式为机器人移动模式,具体分为如下两种。双臂操作与四足行走模式,如图 4a 所示,两条支链作为手臂支链,四条支链作为腿部支链,四足并联平台作为四足机器人搭载双臂机器人行走。可以应用于危险区域或复杂地形的零件、物体运输、救援、道路障碍清除;轮式快速行走模式,如图 4b 所示,在平坦的地面上,机器人靠轮式结构快速移动。

图 4 机器人四足与轮式移动模式

2 机构运动学

2.1 坐标系建立与支链运动学正解

如图 5a 所示建立坐标系, 基坐标系为 $Oxyz$, 车身平台坐标系为 $O_p x_p y_p z_p$, 其中坐标原点 O_p 与动平台的中心重合, z_p 轴垂直于动平台向上, x_p 指向六边形某一边的中点。车身平台为边长为 $2a$ 的正六边形结构, 车身侧板宽度为 b 。机器人具有六条完全相同且对称布置的支链, 支链编号如图 5b 所示。

图 5 坐标系建立与支链分布示意图

对于第 i 条支链($i=1\sim 6$), 其可以看作三自由度串联机械臂, 支链两个连杆的长度分别为 L_1 、 L_2 , 建立 D-H 坐标系如图 5a 中所示, 各个驱动关节的角度为 θ_i ($i=1, 2, 3$), 车身侧板角度为 90° 或者 135° 时, 其连杆坐标变换形式相同, 因此具有相同的 D-H 参数, 如表 1 所示。

表 1 操作支链 D-H 参数表

杆件	θ_i	d_i	a_i	$\alpha_i/^\circ$
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	$-l_1$	0	90
3	θ_3	0	l_2	0

支链在 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 坐标系下的位姿变换矩阵可以表示为

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$$

车身侧板为 90° 时, 第 i 条支链 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 坐标系原点在 $O_p x_p y_p z_p$ 坐标系的位置可以表示为

$$(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}) = (\sqrt{3}a/2, (-1)^{i+1} 3/2a, -1/2b) \quad i=1, 2$$

$$(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}) = ((-1)^i \sqrt{3}a, 0, -1/2a, -1/2b) \quad i=3, 6$$

$$(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}) = (\sqrt{3}a/2, (-1)^{i+1} 3/2a, -1/2b) \quad i=4, 5$$

第 i 条支链在 $O_p x_p y_p z_p$ 坐标系下的位姿可以表示为

$${}^p_3T = \text{Trans}(x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}) \text{Rot}_z(\gamma_i) \text{Rot}_x(\beta) {}^0_3T =$$

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中不同支链的对应 γ_i 角度值如表 2 所示。

表 2 不同支链的 γ_i 角度值

支链序号 i	1	2	3	4	5	6
角度 $\gamma_i/^\circ$	-30	30	90	150	-150	-90

2.2 支链运动学逆解

当给定车身平台的位姿和腿部各支链的支撑位置求解各关节变量时, 需要对支链逆运动学进行求解。对于第 i 条支链, 若已知车身平台的位姿和腿部各支链支撑位置, 那么 A_i 和 C_i 点的位置便已知, 根据支链结构特点, A_i 、 B_i 、 C_i 三点之间存在如图 6 所示几何约束关系。

图 6 支链几何约束关系示意图

其中 $A_i B_i = L_1$, $B_i C_i = L_2$, 并且 $A_i B_i$ 始终垂直于关节 A_i 的轴线方向, 从而得到如下约束方程组

$$\begin{cases} (x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2 + (z_{A_i} - z_{B_i})^2 = L_1^2 \\ (x_{C_i} - x_{B_i})^2 + (y_{C_i} - y_{B_i})^2 + (z_{C_i} - z_{B_i})^2 = L_2^2 \\ \cos \angle z_i, A_i B_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, 矢量 z_i 为关节 A_i 的轴线方向。根据约束方程组便可求得 B_i 点坐标, 一般情况下可以解得两组 B_i 值, 可以根据实际情况对所得解进行筛选, 最后根据几何关系便可得到 A_i 、 B_i 、 C_i 关节变量。

3 腿式行走模式运动分析

3.1 六足行走模式运动分析

六足行走模式是机器人腿式行走下的基础运动模式, 其步态的选择直接影响到机器人能耗和灵活性等能力, 因此选择合适的步态至关重要。丁希仑等^[16-17]先后提出了六足机器人四种典型的“3+3”周期步态, 其中包括 I 型昆虫摆腿步态、II 型昆虫摆腿步态、哺乳动物踢腿步态、混合步态, 同时丁希仑^[16]对六边形对称分布六足机器人的不同步态的稳定性能、能耗水平和越障性能进行了比较, 其中 I 型昆虫摆腿步态相较于其他步态能耗最低, 且该步态中各关节所耗能量较为平均, 机器人基础移动模式以低能耗为目标, 选择该步态作为六足基础模式下的行走步态。

当机器人采用 I 型昆虫步态行走时, 各支链的布置如图 7 所示, 支链 $L_1L_3L_5$ 为一组, 支链 $L_2L_4L_6$ 为一组, 行走方向与 y_p 轴方向平行。腿部支链沿 y_p 轴和 x_p 轴的布置均具有对称性, 因此仅对 L_1L_6 支链的运动性能研究即可。为保证机器人行走具有较高的稳定性, 腿部支链应满足如下 3 个几何约束条件

$$\begin{cases} D_1 = |x_{Ci}| - \sqrt{3}a/2 > 0 (i=1,2,4,5) \\ D_2 = |x_{Ci}| - \sqrt{3}a > 0 (i=3,6) \\ \cos\theta_3(-\cos\theta_2\sin\theta_1 + \sin\theta_2) + \cos\theta_1\sin\theta_3 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, D_1 和 D_2 分别为 L_1 和 L_6 支链在 x_p 方向超出车身平台的长度, 第 3 个约束条件保证 $z_{Bi}-z_{Ci} > 0$, 即支链末端而不是关节 B_i 与地面接触。对于 L_1 支链和 L_6 支链满足上述条件的支链末端工作空间如图 8、9 所示。

图 7 六足行走模式下各支链布置形式

图 8 L_1 支链末端工作空间

图 9 L_6 支链末端工作空间

对于不同的 z 值, 对应机器人车身平台距离地面的不同高度, 其在 y 轴方向的可达范围不同, 对应机器人行走过程中不同的步长 S_1 、 S_2 , 具有 S_1 的支链有 2 条, 具有 S_2 步长的支链有 4 条, 机器人整体的步距指标可以用式(3)表示, 用以表述机器人在不同尺寸时的跨步能力。

$$S = 2S_1 + 4S_2 \quad (3)$$

根据地形和环境需求, 在支链末端的可达工作空间选择合适的高度和步距, 以及 D_1 、 D_2 值。这里选择 $z = -400$ mm, $x = 500$ mm, 给定 $S_1 = 300$ mm, $S_2 = 300$ mm, 此时机器人 L_1 支链和 L_6 支链的支链构型变化如图 10 所示, 支链末端轨迹如图 9 中的实线所示。

图 10 L_1 支链和 L_6 支链的支链构型变化

3.2 四足行走模式运动学分析

当机器人处于双臂操作与四足行走模式时, L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_5 四条支链作为腿部支链, 其余两条支链作为操作支链可以完成夹取、采样等操作任务。此时腿部支链与车身平台可以看作一个四足机器人, 其腿部支链布置形式如图 11 所示。

图 11 四足行走模式下各支链布置形式

为保证机器人在四足行走模式下的稳定性，应使得各支链在 y_p 方向与车身平台中心的距离 D_3 不宜过小，根据车身平台的几何形状，取 $D_3 > 200$ mm， L_1 、 L_2 、 L_4 、 L_5 支链作为腿部支链，四条支链完全对称布置，具有相同的运动性能，满足上式条件的 L_1 支链末端的工作空间如图 12 所示。

图 12 L_1 支链末端工作空间

四足机器人最常用的步态为 Trot 步态，改进型 Trot 步态^[18]在传统的对角小跑步态中引入了调整相，更利于行走过程中双臂操作部分的调整，使得机器人在行走过程中具有更好的运动稳定性和更高的控制精度，该步态的各腿部支链的时序如表 3 所示

表 3 Trot 步态各腿部支链相位表

腿部支链编号	相位				
L_1 支链	0	1	2	1	0
L_2 支链	2	1	0	1	2
L_4 支链	0	1	2	1	0
L_5 支链	2	1	0	1	2

注：“0”表示摆动相，“1”表示调整相，“2”表示支撑相

行走过程中支链末端轨迹采用复合摆线轨迹^[19]如式(4)所示，其中 S 为步幅， H 为迈步高度， T 为周期时间。

$$\begin{cases} x(t) = S \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right) \\ z(t) = H \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right) \end{cases} \quad (4)$$

步幅 S 与迈步高度 H 可以根据支链的工作空间范围进行选取，根据图 12 中 L_1 支链末端的工作空间，可取范围为 $0 < S \leq 500$ mm， $0 < H \leq 200$ mm，可以根据不同任务的需求与实际情况进行步距参数的调整。在本文中令 $S=300$ mm， $H=100$ mm，为使得轨迹远离工作空间边缘，取 $y=300$ mm， $z=-400$ mm，此时腿部 L_1 支链的足端轨迹与支链构型变化如图 13 所示，支链末端轨迹如图 12 中的实线所示。

图 13 L_1 支链构型变化

4 轮式行走模式运动分析

4.1 全向轮式移动模式

当车身侧板处于 90° 位置，并使得轮子与地面垂直接触时，支链的位姿结构如图 14 所示。此时支链各关节满足： $\theta_1=0$ 并且 $\theta_3=\pi/2$ ，车轮前进方向通过 θ_2 改变，由于支链第二个关节可以整周回转，因而该模式下机器人能够实现向各个方向的全向移动。当车轮向前行进时， $\theta_2=\pi/3$ ，此时车体高度为(车体高度为机器人车体平台上表面距离地面的垂直距离， r 为车轮半径)

$$H = \frac{b}{2} + L_1 + r \quad (5)$$

图 14 全向轮式移动模式支链几何关系

该模式下，机构行走的示意图如图 15 所示。

图 15 全向轮式移动模式行走示意图

4.2 低重心轮式移动模式

当车身侧板处于 45° 位置时, 相对于侧板 90° 位置, 机器人高度变低, 可以通过有高度限制的低矮区域, 同时重心变低, 更适合于快速移动。支链的位姿结构如图 16 所示。

图 16 低重心轮式移动模式支链几何关系

根据支链运动学中连杆变换矩阵, 可以得到末端连杆的姿态与各关节变量的变换关系, 将末端连杆姿态用其对应的角度表示, 此种模式下, 轮行过程中需要保持末端连杆水平, 并且轮子始终与地面垂直接触, 此时满足如下几何关系

$$\begin{cases} n_z = \cos \alpha_z = 0 \\ a_z = \cos \gamma_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

前进方向与车体方向的夹角由 α_y 决定, 根据上式几何约束关系, 给定 α_y 后便可确定支链的姿态, 进而得到各个关节角度。车体的高度 H 可以根据变换矩阵 T_3 中的 p_z 按下式计算得到

$$H = |p_z| + r \quad (7)$$

图 17 所示为低重心轮式移动模式下的两种运行状态, 移动方向分别沿坐标系的 $O_p x_p y_p z_p$ 的 x 方向和 y

方向。两种状态下支链的 α_y 分别为 0 和 $\frac{\pi}{2}$, 两种情况下支链各关节的角度与机器人动平台的高度如表 4 所示。

图 17 两种运行状态

表 4 支链各关节角度与车体高度

参数	x 方向运动	y 方向运动
关节 1 角度/rad	0.388	-0.886
关节 2 角度/rad	-1.209	-2.229
关节 3 角度/rad	-2.284	-2.034
车体高度/mm	$228.2+r$	$311.5+r$

当 α_y 不等于 0 或 $\pi/2$ 时, 由于四条支链具有对称的结构, 每条支链对应的 α_y 必须相同才能保证机器人四个轮子处于距离地面相同高度的位置, 若当 α_y 不等于 0 或 $\pi/2$ 且每条支链对应的 α_y 相同, 那么各个轮子将不能沿同一方向, 从而机器人不能移动。

全向轮模式下机器人可以沿任意方向移动, 适应于平坦地形下的灵活快速移动; 低重心模式下机器人只能沿两个方向移动, 但低重心模式下机器人的高度更低, 可以进入更狭窄的工作区域。相对于普通的轮式机器人, 本文提出的轮腿复合机器人可以通过改变侧板角度、变换腿部支链的位形, 改变轮子位置变换行走方向、调整机器人高度, 从而该机器人处于轮式行走模式时, 比普通的轮式机器人更灵活。

5 典型任务步态切换过程

5.1 不同模式间步态切换过程

当机器人处于真实任务环境中, 面临的环境有如下三类: 非平坦地形区域、操作任务区域、平坦地形区域。根据所处环境的不同, 在不同环境下采用不同的模式, 在 V-REP 仿真平台中对机器人的不同模式进行模拟, 如图 18 所示, 在非平坦区域采用六足运动模式, 在操作区域采用双臂操作与四足行走模式, 在平坦地形区域采用轮式运动模式快速移动, 使机器人在面对不同地形时始终具有较高的移动和操作效率。

图 18 不同地形环境下的机器人模式

在完成系列任务的过程中，机器人各模式之间的切换过程至关重要。为保证机器人的稳定性，在模式切换过程中，应尽量保持机器人的动平台处于水平状态，因此需要使 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_5 支链在变换过程中时刻处于完全对称的位置，下面分析各模式切换过程中 L_1 支链的姿态变化。

利用 B_1 与 C_1 的位置来表示 L_1 支链的姿态，如表 5 所示，给定四种模式下准备向其他模式切换时的 L_1 支链的姿态。

表 5 各模式切换状态 L_1 支链构型位置

移动模式	B_1	C_1
六足模式/mm	(229, 584, -324)	(500, 300, -400)
四足模式/mm	(542, 160, -113)	(300, 300, -400)
轮式模式 x/mm	(530, 300, -228)	(130, 300, -228)
轮式模式 y/mm	(173, 602, -311)	(173, 202, -311)

图 19~21 所示为机器人切换模式前后的机器

图 19 六足运动模式与四足运动模式切换过程

图 20 四足运动模式与轮式运动模式切换过程

图 21 六足运动模式与轮式运动模式切换过程

人各支链姿态，可以看出机器人在四足模式与六足模式切换过程中，支链末端在 z 方向高度不发生变化，在四足模式或六足模式与轮式模式的切换过程中，支链末端会发生高度上改变，此时需要保证四条支链的切换的同步性，从而保证动平台始终处于水平位置。

5.2 切换过程稳定裕度计算

对于多模式机器人，其模式切换过程中的稳定性是一项重要指标。如图 22 所示，利用机器人重心在足端支撑平面的垂直投影点到各足端支撑点构成的四边形各边的垂直距离表达机器人的稳定裕度，按照式(8)计算，计算过程中设定机器人具有对称性，各支链中的连杆与电动机质量相同

$$S = \sum_{i=1}^4 d_i \quad (8)$$

图 22 稳定裕度计算示意图

图 23 所示为机器人从六足向四足模式，再向轮式模式切换过程中的稳定裕度变化，从图中可以看出，机器人从六足向四足模式切换过程中稳定裕度降低，再向轮式切换过程中，由于从足端着地状态切换为轮子着地状态，稳定裕度发生突变。但在整个切换过程中，机器人的稳定裕度始终为正值，且维持在较高水平。证明在切换过程中机器人重心始终在足式支撑区域之内，具有良好的稳定性。

图23 模式切换过程稳定裕度变化

在 V-REP 仿真平台对机器人的模式切换过程进行仿真，设置仿真步长为 50 ms，仿真引擎选用 Newton，仿真时间为 15 s，0~5 s 为六足步态，6~10 s 为六足步态向四足步态的切换过程，10.0~12.5 s 为四足步态向轮式步态的切换过程，12.5~15.0 s 为轮式步态，整个仿真过程如图 24 所示。

图24 模式切换过程仿真

测量机器人在仿真过程中的重心位置变化如图 25 所示，从图中可以看出，机器人在模式切换过程中重心位置稳定变化，没有发生超越自身支撑范围的突变，证明了机器人能够连续并且稳定地切换工作模式。

图25 切换过程中重心位置变化

6 结论

(1) 提出了一种新型多操作模式轮腿复合机器人，该机器人可通过操作支链与支撑支链的切换以及支链之间的相互配合，使机器人同时具备操作与移动能力。

(2) 通过对机器人腿式与轮式移动模式下的运动学与步态分析，证明其具备腿式与轮式机器人的移动能力，同时能够释放部分支链完成操作任务，相较于传统的轮腿式机器人，具有更强的环境适应与执行任务能力。

(3) 为保证机器人切换模式过程的稳定性，对机器人各模式之间的切换过程进行了运动分析与稳定裕度计算，在 V-REP 仿真平台完成了对机器人模式切换过程的验证，分析与仿真结果显示机器人能够在不同模式间平稳切换，证明该机器人可以在不同地形环境下完成多任务操作。

参 考 文 献

- [1] 王雁东, 唐昭, 戴建生. 连杆铰接轮腿式机器人的运动学与步态分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(7): 11-19. WANG Yandong, TANG Zhao, DAI Jiansheng. Kinematics and gait analysis of a linkage-jointed wheel-legged robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(7): 11-19.
- [2] 丁希仑, 徐坤. 一种新型变结构轮腿式机器人的设计与分析[J]. 中南大学学报, 2009(S1): 91-101. DING Xilun, XU Kun. Design and analysis of a novel metamorphic wheel-legged rover mechanism[J]. Journal of Central South University, 2009(S1): 91-101.
- [3] DING Xilun, ZHENG Yi. Wheel-legged hexapod robots: A multifunctional mobile manipulating platform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 3-6.
- [4] WILCOX B H. ATHLETE An option for mobile lunar landers[C]// IEEE Aerospace Conference, Big City, Montana, USA, 2008: 1-8.
- [5] 田娜, 丁希仑, 戴建生. 一种新型的变结构轮/腿式探测车机构设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(z1): 268-270. TIAN Na, DING Xilun, DAI Jiansheng. Design and analysis of a novel metamorphic wheel-legs rover mechanism[J]. Machine Design and Research, 2004, 20(z1): 268-270.
- [6] 徐坤, 郑羿, 丁希仑. 六轮腿式机器人结构设计与运动模式分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1):

- 59-71.
- XU Kun, ZHENG Yi, DING Xilun. Structure design and motion mode analysis of a six wheel-legged robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(1): 59-71.
- [7] ARAI T. Robots with integrated locomotion and manipulation and their future[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1997, 9(4): 251-255.
- [8] TAKAHASHI Y, ARAI T, MAE Y, et al. Development of multi-limb robot with omnidirectional manipulability and mobility[C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2000: 2012-2017.
- [9] ARAI T, KOYACHI N, ADACHI H, et al. Integrated arm and leg mechanism and its kinematic analysis[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. IEEE, 1995: 994-999.
- [10] KOYACHI N, ARAI T, ADACHI H, et al. Mechanical design of hexapods with integrated limb mechanism: MELMANTIS-1 and MELMANTIS-2[C]// International Conference on Advanced Robotics, 1997: 273-278.
- [11] INOUE K, ARAI T, MAE Y, et al. Mobile manipulation of limbed robots — proposal on mechanism and control[J]. IFAC Proceedings, 2001, 34(4): 101-106.
- [12] KOYACHI N, ADACHI H, IZUMI M, et al. Control of walk and manipulation by a hexapod with integrated limb mechanism: MELMANTIS-1[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. IEEE, 2002: 3553-3558.
- [13] DING Xilun, YANG Fan. Study on hexapod robot manipulation using legs[J]. Robotica, 2016, 34(2): 468-481.
- [14] YONEDA K, HIROS S. Three dimensional stability criterion of interated locomotion and manipulation[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1997, 9(4): 267-274.
- [15] ZHOU D, LOW K H, ZIELINSKA T. A stability analysis of walking robots based on leg-end supporting moments[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. IEEE, 2000: 2834-2839.
- [16] 丁希仑, 王志英, ALBERTO R. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动性能分析[J]. 机器人, 2010, 32(6): 759-765.
- DING Xilun, WANG Zhiying, ALBERTO R. Typical gaits and motion anlysis of a hexagonal symmetrical hexapod robot[J]. ROBOT, 2010, 32(6): 759-765.
- [17] 徐坤, 丁希仑, 李可佳. 圆周对称分布六腿机器人三种典型行走步态步长及稳定性分析[J]. 机器人, 2012, 34(2): 231-241.
- XU Kun, DING Xilun, LI Kejia. Stride size and stability analysis of a radially symmetrical hexapod robot in three typical gaits[J]. ROBOT, 2012, 34(2): 231-241.
- [18] 常青, 韩宝玲, 罗庆生. 四足机器人改进型对角小跑步态研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2426-2431.
- CHANG Qing, HAN Baoling, LUO Qingsheng. Study on improved trot gait for quadruped robot[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 6(18): 2426-2431.
- [19] 王立鹏, 王军政, 汪首坤, 等. 基于足端轨迹规划算法的液压四足机器人步态控制策略[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 39-44.
- WANG Lipeng, WANG Junzheng, WANG Shoukun, et al. Strategy of foot trajectory generation for hydraulic quadruped robots gait planning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 39-44.

作者简介: 张程煜, 男, 1994 年出生。主要研究方向为机器人机构学。
E-mail: 16121306@bjtu.edu.cn
郭盛(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学。
E-mail: shguo@bjtu.edu.cn
赵福群, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人机构学。
E-mail: 16116362@bjtu.edu.cn