

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.039

轮腿复合可变形机器人设计与运动学分析

王雄¹,高海艳¹,冯磊磊¹,罗萌萌¹,田文杰¹,韦懿轩¹,王宝亮²

(1. 榆林学院,陕西 榆林 719000; 2. 府谷县晟盛环保科技有限公司,陕西 榆林 719400)

摘要:针对非结构化环境中复杂易变的地形特征,结合轮式、足式移动机构的特点,设计一种可变形的轮腿复合机器人,以满足复杂地形下的高机动要求。设计机器人的6自由度足式运动结构和轮式运动结构及其变形结构。构建足式、轮式两种基本运动及变形运动过程的运动学模型;并在逆运动学分析中,对其所有运动模式关键数值进行解算。实验结果表明:机器人能实现足式运动、轮式运动并完成变形,具有较强的环境适应性。

关键词:可变形;轮腿复合机器人;运动学;逆运动学

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)02-0205-05

Design and Kinematics Analysis of Transformable Wheel-legged Robot

WANG Xiong¹, GAO Haiyan¹, FENG Leilei¹, LUO Mengmeng¹, TIAN Wenjie¹, WEI Yixuan¹, WANG Baoliang²

(1. Yulin University, Yulin 719000, China;

2. Fugu Shengsheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Yulin 719400, China)

Abstract: Considering the complicated and changeable topographic features in unstructured environment, a transformable wheel-legged robot was designed by combing characteristics of wheel-based and leg-based travel mechanism to meet high mechanic operating requirements in complex terrains. 6DOF leg moving structure, wheel moving structure and the transformation structure of robot were designed. Kinetic models of these two basic moving modes (leg and wheel) as well as the transformation process were established. Key numerical values of all moving modes were calculated in the inverse kinematics analysis. Experimental results show that the designed robot can move in legs and wheels and accomplish transformation, with strong environmental adaptation.

Keywords: transformable; wheel-legged robot; kinematics; inverse kinematics

0 引言

作为智能制造的典型代表,机器人已经被广泛地应用于生产生活中。机器人在野外作业、家庭服务时,其所处的环境会随时变化。如果机器人不具有较好的地面适用能力,将很难完成规定任务,这就对其运动灵活性和环境自适应性提出了更高的要求。复合机器人能够根据所处环境变化灵活应用自身结构,从而得到了国内外学者的广泛重视^[1]。

复合机器人包括轮-腿式复合机器人、轮-履式复合机器人、腿-履式复合机器人、腿-轮-履复合机器人、球-轮复合机器人等^[2-4]。而轮腿式复合机器人融合了腿式的地形适应能力和轮式高速高效的特点而备受关注^[5-6]。较为典型的代表有美国波士顿动力公司研制的双轮腿机器人Handle,它是用车轮代替脚掌,具有快速移动的能

力^[7-8]。四足机器人Hybtor,每条腿由二自由度的悬挂机构及具有转向功能的驱动轮组成^[9-10]。Roller-Walk机器人将轮子竖起来成为轮式探测车,轮子放平可以进行足式运动^[11]。四足机器人ALDURO,在其足部安装轮子,能实现轮式和腿式运动。Rhex、Asgard等机器人采用多轮辐型轮腿结构,每个轮辐周期性交替与地面接触支撑^[12-16]。

现有轮腿式复合机器人,基本上都是多足结构,整体结构变形较少。相较于其它足式机器人,双足机器人不但具有较高的越障能力和较强的灵活性,而且能够模仿人类的行走方式,特别适合在人类的日常生活和工作中与人协同完成任务,因而被广泛研究^[17-20]。然而,现阶段双足机器人相较于轮式机器人而言还存在机动性不强,转弯不够灵活等问题^[21-23]。

针对双足机器人存在的上述问题,本文以双足人形机器人为基础,结合轮式移动机器人的优

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(23JP201);榆林市科技局产学研项目(2023-CXY-141)

第一作者简介:王雄(1983—),男,陕西榆林人,教授,硕士,研究方向为智能系统,智能机器人,智能结构主动振动控制,12296832@qq.com。

点,设计了一种适应不同路面的足式和轮式可切换,机器人本体可变形的复合型移动机器人。该机器人具有较强环境适应能力,能变形为人形结构,双足行走,增强越障能力及关节灵活性;也能变形为车形结构,轮式运动,提高了运动速度及平稳性。本文设计了机器人的结构并研究了它的运动特性,构建了机器人的运动学方程并对其逆运动学进行数值求解,最后通过样机的实验验证,证明了运动的可行性和可变形性。

1 轮腿复合可变形机器人仿生设计

人类腿部关节分别为髋关节、膝关节和踝关节,从而支撑人类完成基本运动。机器人的仿生结构如图1所示。将人类腿部关节均简化为一个自由度,其中髋关节和膝关节前后摆动,踝关节左右摆动。采用舵机驱动关节运转,对称的两条机械腿各有3个自由度。在机器人顶部安装两个车轮,为驱动轮,用直流电机驱动;在脚底板上安装两个车轮,为辅助轮。踝关节的两个舵机轴向与踝关节和膝关节轴向垂直,能够控制机器人脚底板旋转。显然,机器人具有足式和轮式两种基本运动模式,运动模式转化需要机体变形,机器人实现了完全意义的变形。

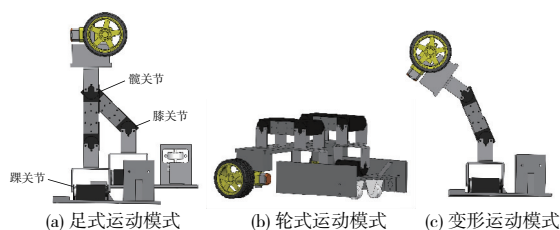


图1 机器人运动模式

1) 足式运动模式

如图1(a)示,机器人脚底板接触地面。当机器人在较复杂的地面环境下,髋关节和膝关节的4个舵机带动连接件前后摆动,机器人双腿运动,此运动方式即为足式运动模式。当机器人以足式运动模式运动时,轮子保持不动。

2) 轮式运动模式

如图1(b)所示,机器人四轮接触地面。在较平坦的地面运动时,4个轮子一起支撑机器人运动,此运动方式即为轮式运动模式。当机器人以轮式运动模式运动时,足式运动部分保持不动。机器人为立方体车形机器人,结构紧凑,速度快,转弯灵活,运动平稳。

3) 变形运动模式

如图1(c)所示,机器人可进行运动模式切换。轮腿变形时,髋关节和膝关节4个舵机转动完成机体变形,踝关节的两个舵机转动完成辅助轮触地或离地。

2 正向运动学分析

为了实现机器人两种基本运动模式及变形,同时为了更好地了解其运动性能,应用数学理论进行运动学建模。

2.1 足式运动模式的运动学模型

机器人两条腿结构对称,假设左腿为摆动腿,右腿为支撑腿。采用 Denavit-Hartenberg 方法建立坐标系,简化结构如图2所示。

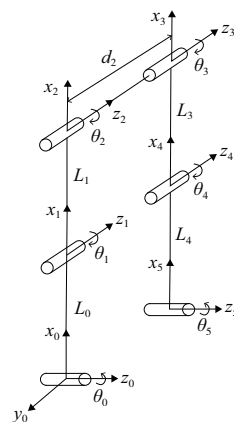


图2 足式运动坐标系

首先在支撑腿踝关节上定义参考坐标系 $\{0\}$, z_0 为机器人前进方向。沿着支撑腿膝关节、髋关节依次定义坐标系 $\{1\}$ 、坐标系 $\{2\}$,进而沿着摆动腿髋关节、膝关节、踝关节依次定义坐标系 $\{3\}$ 、坐标系 $\{4\}$ 、坐标系 $\{5\}$ 。 i 为关节编号,设其转动角度为 θ_i 。踝关节不参与足式运动,因此 θ_0 、 θ_5 均为0。坐标系 $\{1\}$ 、坐标系 $\{2\}$ 与坐标系 $\{0\}$ 呈 90° 关系,相应的膝关节和髋关节转动角度分别为 θ_1 、 θ_2 。坐标系 $\{3\}$ 、坐标系 $\{4\}$ 相应的髋关节和膝关节转动角度为 θ_3 、 θ_4 。 j 为连杆编号, α_j 为连杆扭角, L_j 为连杆长度, d_j 为偏置量。第0关节和第5关节轴线平行,与其余关节轴线垂直,因此 $\alpha_0 = \alpha_4 = 90^\circ$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0^\circ$ 。第0关节、第1关节、第2关节的坐标系原点在同一个平面上,第3关节、4关节、5关节的坐标原点在另一平面内,两平面之间距离为 d_2 ,而 $d_0 = d_1 = d_3 = d_4 = 0$ 。求得末端对于参考坐标系的姿态矩阵 T_1 ,如式1所示。

$$T_1 = \begin{bmatrix} c_{1234} & 0 & s_{1234} & L_0 + L_1 c_1 + L_3 c_{123} + L_4 c_{1234} \\ 0 & -1 & 0 & -d_2 \\ s_{1234} & 0 & -c_{1234} & L_1 s_1 + L_3 s_{123} + L_4 s_{1234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $c_{i \dots n} = \cos(\theta_i + \dots + \theta_n)$; $s_{i \dots n} = \sin(\theta_i + \dots + \theta_n)$; $i = 1, 2, 3, 4, n = 1, 2, 3, 4$ 。

2.2 轮式运动模式的运动学模型

轮式运动模式下,两个驱动轮驱动机器人沿平面运动。具有沿着 x 轴和 y 轴的平动自由度和沿着 z 轴旋转的转动自由度。机器人运动状态如图3所示,参考坐标系为 $x_0 O_0 y_0$ 。初始位置坐标系为 $x_1 O_1 y_1$,目标位置坐标系 $x_2 O_2 y_2$, y_1 轴与 y_2

轴延长线形成角度 $\Delta\theta$, x'_0 和 x'' 为平动方向, Δx 、 Δy 、 R 、 L 如图3所示。由初始运动状态 (x_1, y_1, θ_1) 运动到 (x_2, y_2, θ_2) , 其中 $\theta_1 = \angle x_1 O_1 x'_0$, $\theta_2 = \angle x_2 O_2 x''$, 由几何关系可知 $\Delta\theta = \theta_1 + \theta_2$ 。

则机器人的实时位姿 T_2 如式2所示。

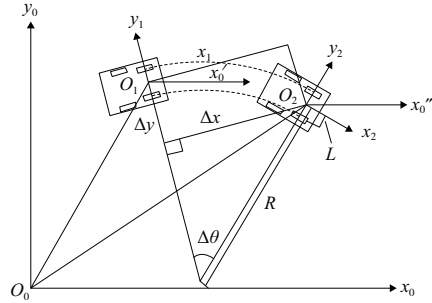


图3 轮式运动坐标系

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \Delta\theta) & -\sin(\theta_1 + \Delta\theta) & 0 & \cos\theta_1 \Delta x - \sin\theta_1 \Delta y + x_1 \\ \sin(\theta_1 + \Delta\theta) & \cos(\theta_1 + \Delta\theta) & 0 & \sin\theta_1 \Delta x + \cos\theta_1 \Delta y + y_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3 变形运动模式的运动学模型

变形运动完成模式互换,无论是轮式向足式变形,还是足式向轮式变形,双腿均保持一致。变形过程可分为两部分,以足式向轮式变形为例,如图1(c)所示。第1部分变形过程:踝关节部分接触地面保持不动,髌关节和膝关节同步转动至顶部驱动轮着地。第2部分变形过程:踝关节转动 90° 至辅助轮着地,变形为车型。因第2部分仅涉及到固定角度变化,不做分析。

两腿的髌关节和膝关节同步运动,变形过程结构简化如图4所示。

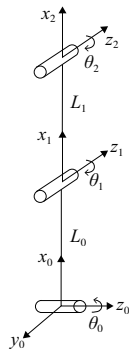


图4 变形运动坐标图

首先定义参考坐标系 $\{0\}$, 固定在踝关节上, 关节0在第1部分变形过程中不转动。即 $\theta_0 = 0^\circ$ 。坐标系 $\{1\}$ 、坐标系 $\{2\}$ 设置在膝关节和踝关

节上,与坐标系 $\{0\}$ 呈 90° 关系,相应的关节1、关节2转动角度分别为 θ_1 、 θ_2 。第0关节轴线与其余关节轴线呈垂直状态, $\alpha_0 = 90^\circ$, 第1关节轴线与第2关节轴线平行, $\alpha_1 = 0^\circ$ 。各连杆坐标系原点都在同一平面上, $d_0 = d_1 = 0$ 。

可求得末端对于参考坐标系的姿态矩阵 T_3 如式3所示。

$$T_3 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & L_0 + L_1 c_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 逆向运动学分析

已知机器人末端位姿矩阵 T 及关键参数求解关节变量,为下一步机器人的运动做准备。对于本文所设计的机器人,根据实际情况存在不同的运动模式。机器人在足式运动模式时,需要求解4个关节角 $\theta_i (i = 1, \dots, 4)$;机器人在轮式运动模式时,需要求解 Δx 、 Δy 及 $\Delta\theta$;机器人在变形过程中,需要求解 θ_1 和 θ_2 。

设末端位姿如式4所示。

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.1 足式运动模式的逆运动学分析

由式(1)和式(4)求得结果如式(5)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \frac{d_2}{\sqrt{d_2^2 + p_x^2}} - \arctan \frac{d_2}{p_x} \\ \theta_4 = \arccos \frac{(p_x - L_0)^2 - 2(p_x - L_0)L_1c_1 + p_z^2 + L_1^2 - 2p_zL_1s_1 - L_3^2 + L_4^2}{2L_3L_4} \\ \theta_2 = \arccos \frac{\sqrt{L_3^2 + L_4^2 + 2L_3L_4c_4 - (p_z - d_2)^2}}{p_x^2 + d_2^2} - \arctan \frac{d_2}{p_x} - \theta_1 \\ \theta_3 = \arccos n_x - \theta_1 - \theta_2 - \theta_4 \end{cases} \quad (5)$$

3.2 轮式运动模式的逆运动学分析

由式(2)和式(4)求得结果如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta\theta = \arccos n_x - \theta_1 \\ \Delta x = (p_x - x_1) \cos \theta_1 + (p_y - y_1) \sin \theta_1 \\ \Delta y = \frac{(p_y - y_1) \cos \theta_1 + (x_1 - p_x) \sin \theta_1}{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 变形运动模式的逆运动学分析

由式(3)和式(4)求得结果如式(7)所示。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \frac{p_z}{L_1} \\ \theta_2 = \arcsin n_z - \theta_1 \end{cases} \quad (7)$$

4 实验验证

基于构建的正逆运动学模型和求解方法进行实验验证如图5所示。

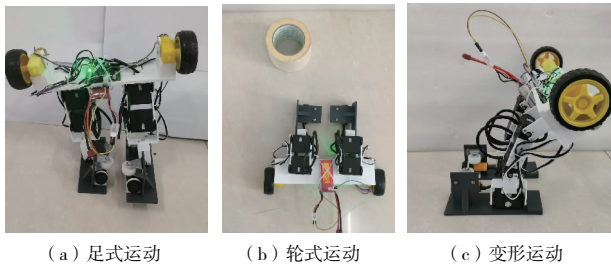


图5 实验验证

实验环境选取较为平整的地面,机器人利用3种运动模式实现足式、轮式及变形。实验室研制的机器人样机实际尺寸 L_0 、 L_1 、 L_3 、 L_4 及 d_2 均为 50 mm。

4.1 足式运动

通过实例,进行逆运动学验证。设末端位姿如式(8),排除其它不合理的解,可得: $\theta_1 = 5.99^\circ$, $\theta_2 = 6.01^\circ$, $\theta_3 = 10.01^\circ$, $\theta_4 = 6.99^\circ$ 。

$$T = \begin{bmatrix} 0.874\ 744 & 0 & 0.484\ 585 & 159.826\ 411 \\ 0 & -1 & 0 & -50 \\ 0.484\ 585 & 0 & -0.874\ 744 & 48.174\ 313 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

按照解,对机器人进行相应的操作,可获得给定的末端位置姿态。足式运动时,前 1/2 周期机器人迈出左腿,右腿支撑辅助配合。后 1/2 周期机器人迈出右腿,左腿支撑辅助配合。以此循环,机器人能够顺利完成双足前行,实验如图 5(a) 所示。

4.2 轮式运动

设 x_1 为 10, y_1 为 20, θ_1 为 20° , 末端位姿如式(9),可得 $\Delta\theta = 29.99^\circ$, $\Delta x = 10.00$, $\Delta y = -5.01$ 。

$$T = \begin{bmatrix} 0.642\ 788 & -0.766\ 044 & 0 & 21.107\ 027 \\ 0.766\ 044 & 0.642\ 788 & 0 & 18.721\ 738 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

按照解,对机器人进行相应的操作,可获得给定的末端位姿。机器人处于轮式运动状态时,依靠直流电机的正反转,完成前进、后退、转弯等一系列运动,能向任意航向行进。实验如图 5(b) 所示,机器人可运动到目标位置。

4.3 变形运动

设末端位姿如式(10),排除其它不合理的解,可得到 $\theta_1 = 20.01^\circ$, $\theta_2 = 24.99^\circ$ 。

$$T = \begin{bmatrix} 0.707\ 388 & -0.706\ 825 & 0 & 96.987\ 656 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0.706\ 825 & 0.707\ 388 & 0 & 17.092\ 692 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

按照解,对机器人进行相应的操作,可获得给定的末端位置姿态。轮式运动转换为足式时,髋关节和膝关节使机器人呈平躺姿势,头部和足部均着地。进而机器人踝关节转动,脚底着地,髋关节和膝关节缓慢运转,直立起身,完成轮式向足式转换。足式运动转换为轮式时,机器人髋关节和膝关节运转,向后卧倒。踝关节转动,机器人辅助轮着地,完成足式向轮式转换。实验如图 5(c) 所示。

5 结语

1) 结合足式、轮式移动机构在复杂地形环境

中的运动特点,提出了一种在非结构化环境下能进行轮腿互换、自身结构可变形的复合型移动机器人。

2) 采用理论分析和实验验证相结合的方法对复合型移动机器人运动学和逆运动学进行分析,为该机器人的运动分析提供了依据。机器人在较为复杂的地面运动时,采用双足行走模式,在较为平坦的地面运动时,切换为轮式运动模式,变形过程简单,结构紧凑,提高了机器人的运动效率。

参考文献:

- [1] 杨武林,张静,张俊俊. 具有被动摆臂的八轮机器人结构设计与仿真分析[J]. 机械传动,2020,44(3): 72-76,83.
- [2] ACKERMAN E. A robot for the worst job in the warehouse: Boston dynamics' stretch can move 800 heavy boxes per hour [J]. IEEE Spectrum, 2022, 59(1): 50-51.
- [3] 郭非,汪首坤,王军政. 轮足复合移动机器人运动规划发展现状及关键技术分析[J]. 控制与决策,2022,37(6):1433-1444.
- [4] XU K, WANG S K, YUE B K, et al. Adaptive impedance control with variable target stiffness for wheel-legged robot on complex unknown terrain [J]. Mechatronics, 2020, 69: 102388.
- [5] 雷涛,徐康,汪首坤,等. 并联六轮腿机器人机身平稳性控制方法研究[J]. 机械工程学报,2021,57(21): 34-44.
- [6] 张国庆,崔建峰,王鑫,等. 轮腿机器人发展与研究综述[J]. 机器人技术与应用. 2024(2): 14-21
- [7] 李晋馥,于泽,连宾宾. 一种多模式轮腿移动机器人的设计与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2025,58(1):12-23.
- [8] 董炳艳,张自强,徐兰军,等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报,2020,56(11): 1-25.
- [9] 秦日鹏,徐坤,陈佳伟,等. 一种星球探测六足轮腿机器人的设计与运动规划[J]. 航空学报,2021,42(1):524244.
- [10] 宋铁民,郝呈晔,岳维亮,等. 新型变形轮腿式移动机器人的运动学分析及设计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(2):111-121.
- [11] 刘超,谭稀岑,姚燕安,等. 一种新型可变形轮腿式机器人的设计与分析[J]. 机械工程学报,2022,58(3):65-74.
- [12] 尚哲,王挺,徐瑶,等. 六轮摇臂移动机器人结构设计与越障动力学研究[J]. 兵工学报,2023,44(11): 3478-3488.
- [13] VIJAYCHANDRA A, ALEX C, MATHEWS M, et al. Amphibious wheels with a passive slip mechanism for transformation [C]//2019 IEEE 4th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). Toyonaka, Japan: IEEE, 2019:960-965.
- [14] CHEN Z H, WANG S K, WANG J Z, et al. Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot[J]. ISA Transactions, 2021, 108: 367-380.
- [15] WEIC R, YAO Y N, WU J X, et al. Development and analysis of a closed-chain wheel-leg mobile platform[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1):80.
- [16] 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.
- [17] ZHENG C Q, LEE K. WheeLeR: Wheel - leg reconfigurable mechanism with passive gears for mobile robot applications [C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019:9292-9298.
- [18] KLEMM V, MORRA A, SALZMANN C, et al. Ascento: a two-wheeled jumping robot [C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019:7515-7521.
- [19] WANGS, CUI L L, ZHANG J F, et al. Balance control of a novel wheel-legged robot: design and experiments [C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China: IEEE, 2021: 6782-6788.
- [20] LIX, YU H Y, FENG H B, et al. Design and control for WLR-3P: a hydraulic wheel-legged robot [J]. Cyborg and Bionic Systems, 2023, 4: 0025.
- [21] MEDEIROS V S, JELAVIC E, BJELONIC M, et al. Trajectory optimization for wheeled-legged quadrupedal robots driving in challenging terrain [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4172-4179.
- [22] ZHOU Q Q, YANG S C, JIANG X Y, et al. Max: a wheeled-legged quadruped robot for multimodal agile locomotion [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(4): 7562-7582.
- [23] CHEN H Y, WANG T H, HO K C, et al. Development of a novel leg-wheel module with fast transformation and leaping capability [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 163: 104348.

收稿日期:2025-03-05