

转向盘式六足机器人设计及全方位运动控制

王国富^{1,2}, 高峰¹, 罗杨宇², 徐国艳¹

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 100191 北京; 2. 中国科学院 自动化研究所 高技术创新中心, 100190 北京)

摘要: 基于转向盘的全方位步行机器人综合了腿式机器人与车辆方向盘的结构特征, 为了对其运动性能及运动控制进行系统研究, 介绍了该机器人的设计思想、机构特色及运动原理. 建立了该机器人的等效操作臂模型, 给出操作臂的雅克比矩阵, 推导出操作臂在关节空间和笛卡尔空间下的动力学方程, 以此给出了转向系统的非线性闭环控制模型. 基于 Adams 与 Matlab/Simulink 对机器人全方位运动进行了 PID 联合控制仿真, 并对样机模型进行了实验研究. 结果表明: 转向盘式步行机器人在全方位运动控制方面灵活性好, 方向精度高, 控制简单可靠.

关键词: 多足机器人; 全方位运动控制; 方向转盘; 月球车; 智能车辆

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0129-06

Design and omnidirectional motion control of hexapod robot with a steering-wheel

WANG Guo-fu^{1,2}, GAO Feng¹, LUO Yang-yu², XU Guo-yan¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China;

2. High-tech Innovation Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 100190 Beijing, China)

Abstract: The omnidirectional walking robot with a steering-wheel synthesizes the mechanism features of legged robot and vehicle's steering wheel. To investigate the kinematic characteristics and motion control systematically, the design idea, mechanism features and kinematics principle of the robot are introduced. Then an equivalent manipulator model is built, the Jacobian of the manipulator is given and dynamics both in joint space and Cartesian space are developed, the resulting nonlinear closed-loop control system can be obtained based on the formulated dynamics equations. The co-simulation PID control of omnidirectional motion is implemented based on ADAMS and Matlab/Simulink, the experiments on the prototype is performed. The simulation and experiments validate that the robot with a steering wheel can be manipulated flexibly and accurately in omnidirectional motion, and the control method is simple and reliable.

Key words: multi-legged robot; omnidirectional motion control; steering wheel; lunar rover; intelligence vehicle

六足机器人因具有一些仿昆虫属性且容易实现静态稳定连续行走, 多年来一直是腿式机器人领域的研究热点. 依据六足绕机体分布的形态不同, 六足机器人总体上可分为两大类: 一类六足分布于矩形机体两侧, 如美国 MIT 研制的行星探测

六足机器人 Genghis^[1], 19 个自由度的六足机器人 Attila 和文献[2-4]提到的几种仿生六足机器人等; 另一类六足绕机体圆周以六边形均匀分布, 如美国 JPL 实验室研制的全地形六足探测机器人 ATHLETE^[5] 和日本大阪大学研制的腿臂统一型步行机 ASTERISK^[6] 等. 基于不同的六足机构特征, 步态规划也分为六足分布于矩形机体两侧的常规步态^[7-8] 和绕机体圆周以六边形分布的步态, 文献[9-11]分别对不同步态在越障、爬坡、容错、转向等方面进行了研究. 目前的六足步行机

收稿日期: 2011-12-27.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2010AA101405).

作者简介: 王国富(1969-), 男, 博士;

高峰(1955-), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王国富, gfwch@ae.buaa.edu.cn.

器人不论六足是按矩形机体两侧分布还是正六边形均匀分布,其行走和转向方式都是靠直接控制腿的运动实现,受步态规划和行驶工况所限,其姿态控制较为复杂,全方位运动效率及运动性能亟待改善.本文提出的转向盘式全方位六足步行机器人,在常规六足机器人的基础上增加了一个类似车辆的转向盘机构,其运动效果是直线运动与转向运动的复合运动,相比于常规的六足步行机构,该类机器人具有直线行进步态和全方位转向步态独立又统一的特点,因而全方位控制变得简单高效,为提高腿式移动机构转向控制与姿态控制较为复杂的问题给出了一种新的解决方案^[12].本文首先介绍了全方位六足步行机器人的设计思想和运动特点,然后建立转向系统的等效机构模型,并推导出机器人的转向系统在关节空间和笛卡尔空间下的动力学方程,接着对全方位运动进行了仿真跟踪控制,最后对转向盘式全方位机器人样机进行实验研究,验证其独特的运动性能.

1 全方位转向设计思想及运动特色

平行板式双三足机器人是六足步行机构的一种特例,机构的运动是靠上下两平行板的相对运动实现.如何使一对平行板作相对的全方位运动,以前学者曾进行过相似机构的研究^[13-14],并试制了样机,但由于机构自由度过多,控制过程过于复杂而难于实现,为了使这种机构具有更好的可行性,必须在限制自由度的基础上保持其灵活性.如图1所示的一组平行板结构,上下两板通过方形轴联接,因滑槽与平板之间是相对固定的,两板只能沿板上滑槽的方向作相对运动,因而只具有较好的直线运动性能.

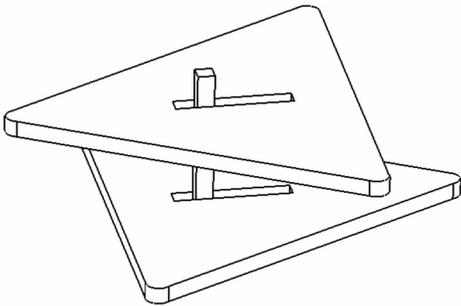


图1 带滑槽的平行板结构

为了使其具有良好的全方位运动性能,实现滑槽方向相对于平板的灵活改变,需要使滑槽从平板上分离出来,这样一种直线运动和转向运动各自独立的转向盘机构就产生了.如图2所示,将平行板上的一对滑槽从板上分离出来,并通过带

滑块的连接轴连接,这种结构可保持上下盘中的滑槽总是保持平行,且能相对于平行板灵活转向,在大大减少其冗余自由度的前提下,且不失灵活性,从而增强了机构全方位运动的可行性.

考虑到运动的稳定性,每个支架用三足支撑,平板设计为三角形支架(Δ架),因而它实际是具有一对平行板的双三足机构,本质是通过上下转盘的相对运动带动其相连的平行三角形支架产生相对运动,转向盘与Δ架之间的装配图如图3(a)所示,步行机构的总体外观如图3(b)所示.

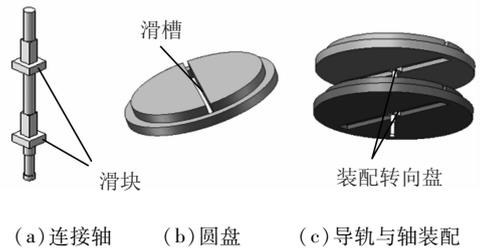


图2 转向盘组成

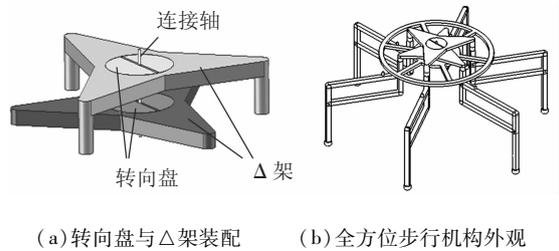


图3 转向盘与步行机构整体外观

因此,该机器人的转向结构包括平行的上下Δ架,有平行滑槽的一对圆盘,带滑块的使两滑槽保持平行的连接轴,其转向系统实际为一个转动移动RP操作臂,在功能上等效于一个可伸缩的旋转导轨.由于其直线行进和转向运动各自独立,可以对这两种运动方式分别进行研究.

直线行进步态是在两组腿交替踏步的基础上,仅控制两个Δ架沿导轨方向作相对运动,而导轨的转动角度保持为零,此时机器人在平地上将走出直线轨迹,图4(a)为机器人在虚拟环境下的仿真过程.全方位转向步态是在两组腿交替升降的基础上,不仅控制两导轨的在滑槽方向上的相对运动,同时控制导轨的转向,即在直线运动的基础上增加一个转向控制,图4(b)是机器人沿圆弧轨迹行走过程的多帧图,图中显示在转向过程中各足的相对方向保持不变.图4(c)显示机器人具有零半径转弯特性,可走出任意的折线轨迹.事实上,控制转向盘内导轨的转角,可以使机器人在其行走面上走出任意的轨迹,如图4(d)所示.

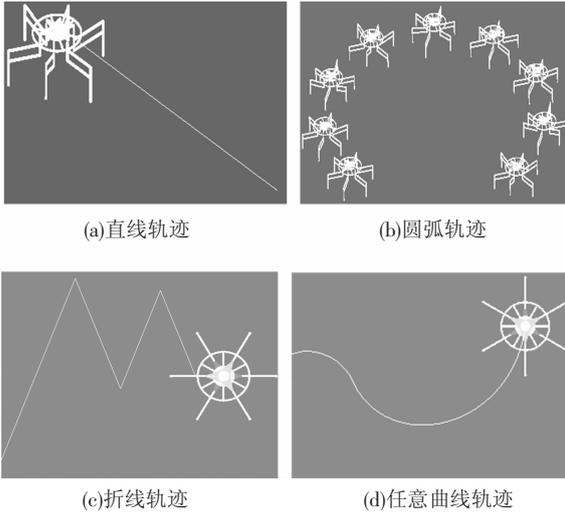
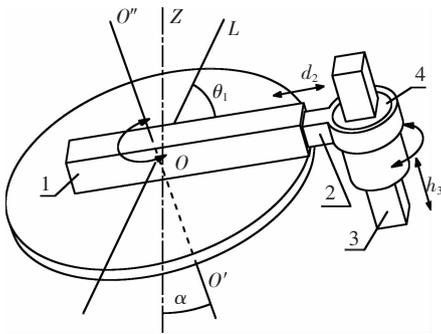


图 4 全方位步行转向轨迹

2 转向盘等效模型及动力学分析

2.1 等效模型的建立

转向系统的等效模型建立在其机构特点和运动分析的基础之上, 由以上的机构描述及分析可知, 带滑块的连接轴连接的上下圆盘实际等效于一个 RP 操作臂. 因为上下圆盘嵌入在上下 Δ 架内, 处于摆动相的 Δ 架相对于支撑相 Δ 架只产生平移运动, 因而摆动相 Δ 架与转盘之间反向转动, 摆动相的腿部垂直于导轨方向作平移运动, 为简化分析, 假定三腿运动一致, 则合力作用在摆动相转盘中心线上. 假定机构为刚体模型, 不考虑连接轴的质量, 该机构的转向系统在运动过程中可等效为一 RPRP 操作臂机构, 相应的等效对应关系如图 5 所示.



1—支撑导轨; 2—摆动导轨; 3—摆动腿; 4—摆动相 Δ 架.

图 5 转向系统等效机构

2.2 关节空间动力学方程

图 5 中, 处于支撑相的导轨 1 绕与其轴线垂直的轴 $O'O''$ 转动, 导轨轴中心线与 $O'O''$ 的交点为 O , 其旋转形成的平面内过 O 点与水平面平行的直线为 L . 作用于导轨 1 的驱动力矩为 τ_1 , 作用于导轨 2 和腿部的驱动力分别为 τ_2 、 τ_3 , 与该操作臂

的基本模型参数、运动过程中位姿参数和环境参数有直接关系, 各参数说明如表 1 所示.

表 1 模型动力学相关参数

参数分类	参数说明	参数符号
模型参数	支撑导轨质量	m_1
	摆动导轨质量	m_2
	摆动腿质量	m_3
	摆动相 Δ 架质量	m_4
	支撑导轨 1 的惯性张量	I_{z1}
	支撑导轨 2 的惯性张量	I_{z2}
环境参数	重力加速度	g
	旋转平面与水平面夹角	α
位姿参数	旋转导轨与直线 L 的夹角	θ_1
	支撑导轨质心与转轴 $O'O''$ 距离	l_1
	摆动导轨质心与转轴 $O'O''$ 距离	d_2
	摆动腿质心与转轴 $O'O''$ 距离	d_3
	摆动转盘中心与转轴 $O'O''$ 距离	d_4
	腿部质心上下运动的位移	h_3
	摆动导轨质心与摆动腿轴线距离	l_{23}

因为模型基本参数均为常量, 摆动腿质心与摆动相转盘中心线重合, 即 $d_4 = d_3$, 且 $d_3 = l_{23} + d_2$, l_1 、 l_{23} 为常量, 重力加速度为常量, 因而该操作臂的动力学方程中仅包括 4 个独立变量, 分别为 α 、 θ_1 、 d_2 和 h_3 , 利用拉格朗日基于能量的动力学方法可求解各关节的驱动力矩或驱动力 τ , 这里 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$.

操作臂关节空间方程的形式可写为

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta); \quad (1)$$

$$M(\Theta) = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$M_1 = m_1 l_1^2 + m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2 + m_4 d_4^2 + I_{z1} + I_{z2};$$

$$V(\Theta, \dot{\Theta}) = \begin{pmatrix} 2(m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 \\ -(m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$G(\Theta) = \begin{pmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \cos \theta_1 \sin \alpha \\ g(m_2 + m_3 + m_4) \sin \theta_1 \sin \alpha \\ g m_3 \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.3 雅克比矩阵与笛卡尔状态空间方程

图 6 为操作臂坐标系布局图. 正对机构的转动平面, O_0 为在导轨处于支撑相时的旋转中心, 假定某一时刻导轨 1 为支撑相绕 O_0 点旋转, 旋转角度为 θ_1 , 导轨 2 通过转向连接轴沿导轨方向与

导轨1相对运动. 以 O_0 点为原点建立坐标系 $\{0\}$, $\{0\}$ 绕 O_0 旋转 θ_1 得到坐标系 $\{1\}$, $\{1\}$ 原点 O_0 平移到两导轨移动关节位置得到坐标系 $\{2\}$, $\{2\}$ 原点平移到导轨2与腿部的交点上得到坐标系 $\{3\}$, $\{3\}$ 原点平移到足端得到坐标系 $\{4\}$, 两导轨移动关节距 O_0 为 l_0 , 两导轨移动关节距腿部与导轨2的移动关节为 d , 腿部距足端为 h . 可导出 O_0 坐标系下的速度雅克比矩阵为

$${}^0J(\Theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -(d+l_0)\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & (d+l_0)\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

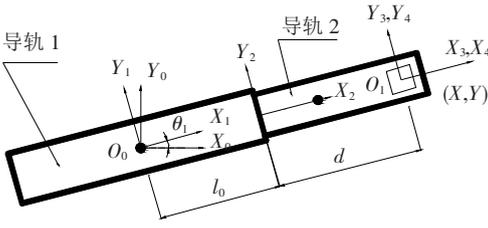


图6 操作臂坐标系布局

考虑到 $l_0 + d = d_3, d_2 = d_3$, 在末端执行器坐标系 $\{4\}$ 中的雅克比矩阵为

$$J(\Theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由此求得笛卡尔状态空间方程为

$$F = M_x(\Theta)\ddot{X} + V_x(\Theta, \dot{\Theta}) + G_x(\Theta),$$

$$M_x(\Theta) = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & (m_2 + m_3 + m_4)/d_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$M_1 = m_1 l_1^2 + m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2 + m_4 d_4^2 + I_{z11} + I_{z22},$$

$$V_x(\Theta, \dot{\Theta}) = \begin{pmatrix} 2(m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \dot{d}_2 \theta_1 \\ -((m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \dot{d}_3 \theta_1^2 + (m_2 + m_3 + m_4) \dot{d}_2^2)/d_3^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$G_x(\Theta) = \begin{pmatrix} g(m_1 l_1 + m_2 d_2 + m_3 d_3 + m_4 d_4) \cos \theta_1 \sin \alpha \\ g(m_2 + m_3 + m_4) \sin \theta_1 \sin \alpha / d_3 \\ gm_3 \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (9)$$

基于以上的动力学方程, 可以看出转向盘式全方位步行机器人的转向系统是多输入多输出时变非线性控制系统, 在关节空间中其控制律为

$$\tau = K_p E - K_d \dot{\Theta} + G(\Theta). \quad (10)$$

式中: K_p 和 K_d 为对角增益矩阵. 与式(1) 联立得到全局渐近稳定的闭环系统为

$$M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + K_d \dot{\Theta} + K_p \Theta = K_p \Theta_d. \quad (11)$$

3 全方位运动跟踪控制

采用 ADAMS 软件建立全方位步行机构的转向系统模型, 在建立的控制系统输入输出环节基础上创建 PID 环节, 采用 Matlab/Simulink 设计基于 PID 控制算法的步行车辆运动轨迹跟踪控制方案, 并运用联合控制仿真的方法对转向盘机器人进行运动跟踪控制, 机器人的转向跟踪控制系统如图7所示.

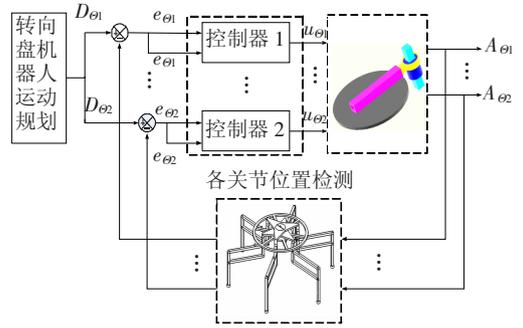


图7 机器人转向跟踪控制系统方框图

通过接口设计连接成如图8所示的PID联合控制仿真方案.

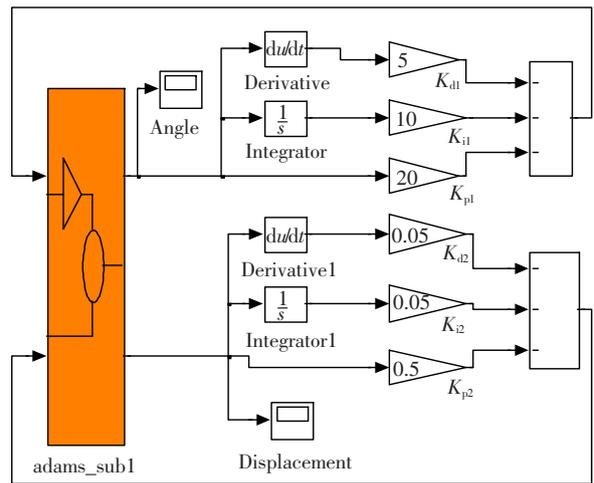


图8 PID联合控制 Simulink 仿真程序

这里对转向盘角度变量 Angle 的控制目标是令其在 15° 斜坡面上旋转 30° , 对应的角速度变量为 Angle-velo; 位移变量 Displacement 的控制目标是令两转向盘中心线从初始相距 80 mm 位置的

不重合位置移动到重合位置,对应的位移线速度变量为 $CM\text{-velo}$;重力在斜面上的分量作为外部扰动.经调试确定两变量的 PID 增益参数分别为: $K_{p1} = 20, K_{i1} = 10, K_{d1} = 5; K_{p2} = 0.5, K_{i2} = 0.05, K_{d2} = 0.05$,仿真时间为 $0 \sim 2$ s.

最后的跟踪控制结果如图 9 所示,联合仿真结果证明 PID 控制算法在转向盘机器人的转向模型控制中取得了较好的位置速度跟踪控制效果.

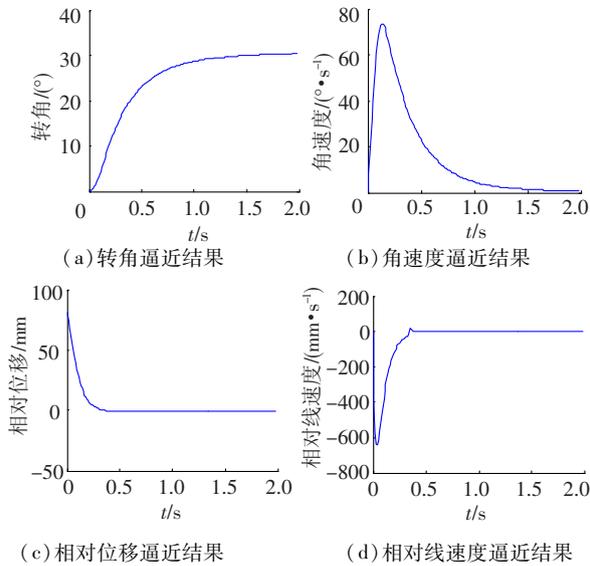


图 9 转向跟踪控制仿真

4 样机实验验证

实验中研制的转向盘机器人样机模型如图 10 所示.依据运动仿真的结果,对样机各部分进行协调控制.控制样机在平地上运动,结果证明在不施以转向力矩的情况下,该样机总沿着导轨的方向作直线运动,行走速度约 4 m/min,测出直线行走的方向偏差小于 5% ,行走轨迹类似图 4(a)的直线效果.转向控制实验可采用手动和电机控制的方式进行,这样机器人的连接轴的功能就类似于车辆上的方向盘,此时,足端运动轨迹是直线运动与转向运动的复合运动.为使机器人能走出如图 4(b)的圆弧,在直线行走运动的基础上,控制转向盘的转角使其每一步转动 3.6° ,将每一步连接轴顶点在地面的投影坐标记录下来,连续测量 25 步并连线形成近似 $1/4$ 的圆弧,如图 11 所示.总的方向误差小于 5% .误差来源分析:1)运动关节较多;2)机体重量导致驱动部分摩擦较大;3)控制和测量误差.

为使机器人走出图 4(c)的折线运动效果,只需在直线行走基础上间断地控制转向盘的转角,每次改变转向必须在摆动相的腿抬起到着地之间的时间内完成,若持续地转动连接轴使导轨方向

持续改变,机器人可以走出类似于图 4(d)的任意曲线效果,大大拓展了常规车辆的应用领域.结合超声波探测定位技术^[15],它可以应用于需要不断精确转向的森林探测等领域.

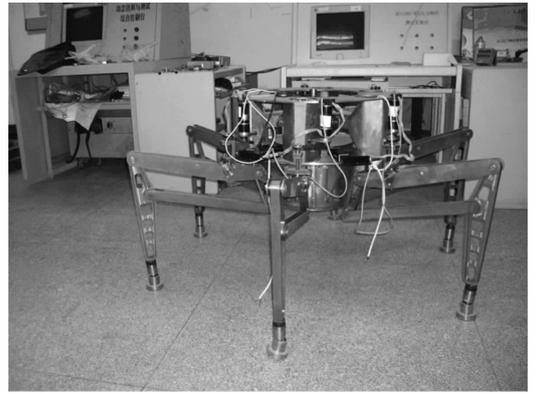


图 10 机器人试验样机

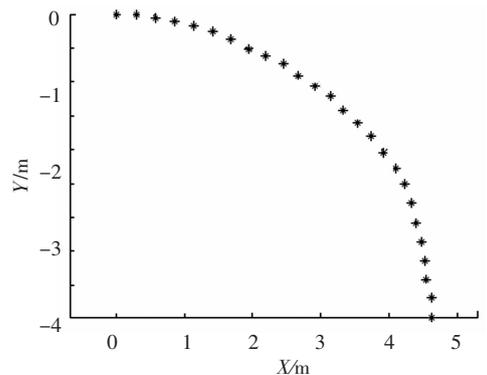


图 11 机器人沿 $1/4$ 圆弧行走实验

5 结论

1)转向盘式全方位六足步行机器人在常规腿式机器人的基础增加了转向盘机构,具有零半径转弯的运动特性,具有良好的直线行走性能和灵活精确的全方位转向性能,方向性好,控制简单可靠.

2)基于建立的机构等效操作臂模型,推导出其关节空间和笛卡尔空间坐标系下的动力学方程,给出了其转向系统的闭环控制模型.

3)对六足机器人全方位运动进行了跟踪控制联合仿真,证明了 PID 算法在机构的转向过程中具有良好的位置和速度跟踪效果;样机实验进一步证明了机器人全方位运动灵活精确,简单易控.

参考文献:

- [1] BROOKS R A. A robot that walks: emergent behaviors from a carefully evolved network [J]. Neural Computa-

- tion, 1989, 1:253 – 262.
- [2] ESPENSCHIED S, QUINN R D, CHIEL H J. Biologically-based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, 18:59 – 64.
- [3] QUINN R D, NELSON G M, BACHMANN R J. Parallel complementary strategies for implementing biological principles into mobile robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(3): 169 – 186.
- [4] KLAASSEN B, LINNEMANN R, SPENNEBERG D. Biomimetic walking robot scorpion: control and modeling [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 41: 69 – 76.
- [5] WILCOX B, LITWIN T, BIESIADECKI J. Athlete: a cargo handling and manipulation robot for the moon [J]. *Journal of Field Robotics, Special Issue on Space Robotics: Part III*, 2007, 24(5): 421 – 434.
- [6] TOMOHITO T, ARAI T, INOUE K, *et al.* Development of limb mechanism robot-asterisk[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2006, 18(2): 203 – 214.
- [7] 陈学东, 孙翊, 贾文川. 多足步行机器人运动规划与控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [8] LEE T T, LIAO C M, CHEN T K. On the stability properties of hexapod tripod gait [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(4): 427 – 434.
- [9] KAMIKAWA K, ARAI T, INOUE K, *et al.* Omni-directional gait of multi-legged rescue robot [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, US: IEEE, 2004: 2171 – 2176.
- [10] YANG J M, KIM J H. Fault-tolerant locomotion of the hexapod robot[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B*, 1998, 28(1): 109 – 116.
- [11] PREUMONT A, ALEXANDER P, GHUYS D. Gait analysis and implementation of a six leg walking machine [C]//Fifth International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, US: IEEE, 1991: 941 – 945.
- [12] WANG Guofu, GAO Feng, CUI Ying, *et al.* Kinematic control of dual-tripod walking robot with a steering-wheel [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guilin: [s. n.], 2009: 2415 – 2420.
- [13] FUKUDA T, ADACHI Y, HOSHINO H, *et al.* Posture control of 6-leg walking robot [C]//Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation. Nagoya Aichi, Japan: [s. n.], 1995: 21 – 27.
- [14] OTA Y, INAGAKI Y, YONEDA K, *et al.* Research on a six-legged walking robot with parallel mechanism [C]//Proc of the International Conference on Intelligent Robots and Systems. Victoria BC, Canada: [s. n.], 1998: 241 – 248.
- [15] 王国富, 高峰, 杨新红, 等. 基于超声波的移动机器人多目标探测定位方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(12): 1519 – 1523.

(编辑 魏希柱)