

文章编号: 1001-2486(2008)04-0098-05

基于球齿轮的新型轮腿复合式移动平台设计研究^{*}

张 湘, 张立杰, 潘存云, 李明宇

(国防科技大学 机电工程及自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 复合式移动系统是当前移动机器人研究的热点之一。总结了已有的一些轮-腿复合式移动系统的研究成果及结构特点, 提出一种基于球齿轮机构的新型轮-腿复合式移动平台的结构设计方案, 这种新型移动平台的轮腿机构具有不同于已有轮-腿复合式移动系统独特的运动特征, 在结构上可实现“轮”、“腿”的真正融合, 使得平台具有轮式、腿式和轮-腿复合三种移动模式, 可实现直行、斜行、小半径转弯甚至原地转弯等多种运动姿态。对轮腿机构进行了计算机虚拟模型运动仿真研究, 并对平台样机进行了姿态调整实验, 结果表明这种新型移动平台能够实现设定的多种复杂运动姿态。

关键词: 球齿轮; 轮腿复合式; 复合式移动系统; 移动平台; 轮腿机构

中图分类号: TH112; TP242 **文献标识码:** A

A New Wheel-leg Hybrid Mobile Platform Based on the Spherical Gear

ZHANG Xiang, ZHANG Li jie, PAN Cun yun, LI Ming yu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The hybrid locomotion system is a hotspot in mobile robot research. This paper firstly gives a brief review of the achievements accomplished in wheel-leg hybrid mobile platform, and the structural characters. Based on the spherical gear mechanism, a new mobile platform with wheel-leg hybrid mechanism is put forward. The wheel-leg mechanism has a novel character, that is, the wheel mode and the leg mode can be fused not only in structure but also in their function. As a result, the mobile platform has three mobile modes: independent wheel mode, independent leg mode and wheel-leg fusion mode. The mobile platform can realize several mobile poses such as straight moving, sloping moving, turning in a smaller radius and even turning in place. The current design was testified by the results of simulation using virtual prototype technology and experiments based on the wheel-leg system and the mobile platform physical prototype.

Key words: the spherical gear; the wheel-leg hybrid mode; the hybrid locomotion system; mobile platform; wheel-leg hybrid mechanism

移动系统是移动机器人的重要组成部分。地面移动机器人的移动系统可划分为轮式、腿式、履带式 and 复合式等, 适应于不同的地形环境。其中复合式移动系统地形适应性最强, 具有较好的机动性和环境适应能力, 是移动机器人研究的热点。本文总结了轮-腿复合式移动平台的一些研究成果, 分析其特点和不足, 提出一种基于渐开线球齿轮的新型轮-腿复合式移动平台的设计方案。该方案构造了一种基于渐开线球齿轮的新型轮腿机构, 使得移动平台可实现直行、斜行、小半径转弯甚至原地转弯等多种运动姿态, 达到了“轮”、“腿”完全融合。轮腿机构是实现轮腿复合功能的关键, 因此着重分析了该轮腿机构的结构特点, 对其虚拟模型进行了运动仿真和物理样机试验。最后对平台样机进行了初步的姿态调整试验。试验结果表明这种基于渐开线球齿轮的轮腿移动系统能够实现多种复杂的运动姿态, 证明了方案的可行性。

^{*} 收稿日期: 2008-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475058)

作者简介: 张湘(1973-), 女, 讲师, 硕士。

1 传统的轮-腿复合式移动平台

轮-腿复合式移动系统兼有轮式和腿式移动系统的功能和特点。经过多年研究和发展, 已经研制出多种结构形式, 结构复杂程度和运动效率各不相同。这些移动系统从结构和功能上大体上可以分为两类。

第一类从结构上看是将“轮”安装在“腿”的末端, 以“轮”作“脚”, 功能上既能够以单一方式移动, 又可以混合方式移动, 具有三种移动方式, 是比较常见的一类。哈尔滨工业大学先后研制出两款轮-腿复合式移动平台 HITAN-HYBTOR^[1] 和 HITAN-I^[2] (图 1), 它们都有四个“轮-腿”子移动系统, 每个子系统有四个自由度, 车轮独立驱动, 腿关节有三个自由度, 可实现轮式或腿式移动。轮式移动时, 腿上各关节锁定, 由车轮独立驱动; 腿式移动时, 轮上驱动锁定。Roller-walker^[3] 使用了被动轮, 车轮不能独立驱动, 依靠腿的驱动产生的推力实现轮式移动。它的移动系统最大的亮点在于车轮可以绕踝关节转过 90° 后, 作为腿式移动时的“脚”。Walk' n Roll^[4] 的移动系统同样是在四条腿的末端装有车轮, 不同的是它的前两条腿各有三个自由度, 末端为可锁定的被动轮, 而两条后腿只有一个自由度, 末端安装的车轮独立驱动, 可以实现轮式、混合式和爬台阶三种运动模式。两足步行机器人的移动系统中也能见到轮-腿复合式, WL-16^[5] 是世界上第一台可载人的两足机器人, 它的脚上就安装有一套 WS-2 轮式机构, 通过调整两脚的姿态, 既可以两轮着地进行轮式移动, 也可以像普通两足机器人一样步行前进。

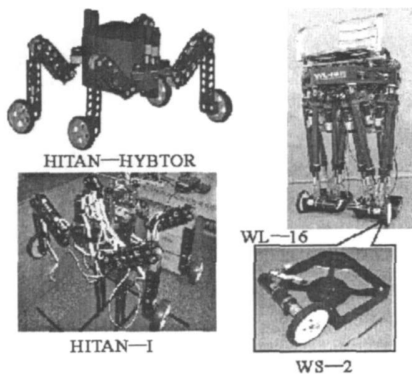


图 1 轮-腿复合式移动平台

Fig. 1 Wheel leg hybrid locomotion platform surface

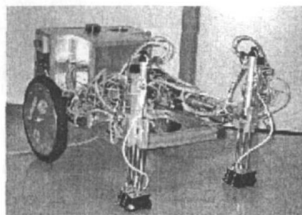


图 2 Wheelleg

Fig. 2 Wheelleg



图 3 渐开线球齿轮

Fig. 3 The involute spherical gear

第二类从结构上看“轮”和“腿”完全分离, 但是在移动中两者同时发挥作用。Wheelleg^[6] 无论外观还是原理上都类似于人拉两轮车, 它的移动系统由两条腿和两个车轮组成(图 2), 每条腿有三个自由度, 两个车轮分别由一台直流电机驱动。这种结构可以充分利用轮式承载能力大的优点, 载荷主要由轮式机构承受, 腿式机构增大了路面附着, 帮助越障。可以看出, 这种系统实际上只是两种移动方式的简单组合, 称为“轮-腿组合适”比“轮-腿复合式”更为恰当。Chariot-I 和 Chariot-II^[7] 也属于这一类, 两个巨大的中心轮既用于承受重量, 作为移动系统又有较好的地形适应性。

分析以上所述的轮-腿复合式移动平台普遍存在以下不足: (1) 两种子系统一般在结构上具有独立性, 没有完全融合。(2) 控制困难。一个完整的轮式系统除了车轮还包括驱动电机, 以“轮”作“脚”的结构方式使得整个轮式系统成为腿的负载, 由于距离腿的肩关节较远, 惯量增大, 增加了控制难度。(3) 结构复杂。一方面轮式电机的布线使得机构更加复杂; 另一方面, 两种移动模式的转换需要设计专门的辅助机构, 如文献[1-2]中的锁定装置, 文献[5]中用于调整脚的姿态的机构等。(4) 系统性能没有充分挖掘。Roller-walker^[3] 的一个显著特征就是车轮可绕踝关节转动, 车轮端面着地可有效减小对地面的压强, 其余未见类似设计。

下面提出一种基于渐开线球齿轮的新型轮-腿复合式移动平台, 它的轮腿机构在结构上具有不同于传统移动系统的独特特征, 不属于上述任何一类, 是真正的“轮-腿融合式”。

2 基于球齿轮的新型轮-腿式移动平台

2.1 球齿轮机构和多系杆球齿轮机构

图3是一对渐开线球齿轮的照片,它具有两个转动自由度^[8]。多组球齿轮按一定规律串联可以构成一种多系杆球齿轮机构^[9],文献[9]中详细论述了该新型空间轮系的驱动原理和运动分析,证明其可以实现向空间任意方位的偏摆运动,并能实现独立的自旋运动。

2.2 基于球齿轮的轮腿机构及复合式移动平台

自然界的动物实现腿式行进依靠的是肢体的摆动;轮式移动是人类的发明,依靠的是传动轴对车轮连续不断的旋转驱动。基于球齿轮构造如图4所示的轮腿机构,在输出轴的末端安装车轮。它具有偏摆和自旋两种运动模式。一个轮腿由三台电机驱动,其中两台直线电机用于驱动腿的偏摆运动,一台旋转电机用于驱动轮腿自旋。作为移动平台的轮腿,偏摆运动的组合可以实现平台的腿式行进,自旋运动则能够保证平台以轮式方式移动,这样由一套装置就实现了轮-腿复合的功能。

为保证车体的稳定,同时又不至于使控制系统过于复杂,平台采用四腿结构,由四个轮腿、车架和控制系统构成。车架呈矩形,用于安装控制箱和轮腿系统。四个轮腿通过基座固联于车架上,各自独立驱动。图5是该新型移动平台和轮腿系统的三维模型。该新型移动平台既可作为运送机器人独立使用,也可以搭载仪器,用作侦察、营救、排爆、无人作战系统、行星漫游车等各种移动机器人的基础平台。

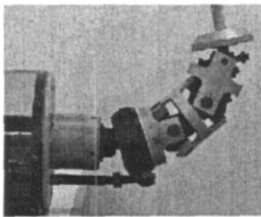


图4 基于球齿轮的轮腿机构

Fig. 4 The Wheel leg hybrid mechanism based on the spherical gear

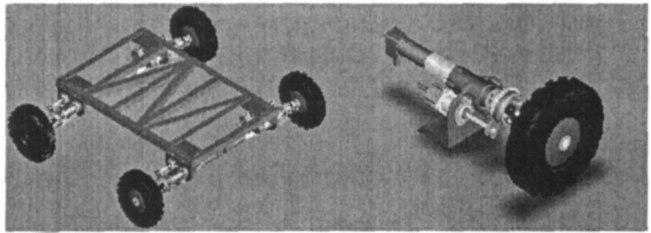


图5 移动平台和轮腿的模型

Fig. 5 The locomotion platform and wheel leg virtual prototype

2.3 移动平台可实现的运动姿态

该移动平台具有轮式、腿式及轮-腿复合式三种移动方式,可保证平台在不同路面环境下都能获得较理想的移动速度和运动效率。

在平坦路面上,轮式移动是最理想的选择。由于平台各腿独立驱动,它们的协调控制可以使得轮式移动具有更多的运动姿态,例如直行、斜行、转弯,甚至原地旋转等,如图6所示。在复杂地形环境下,平台的移动系统可主动适应地形特征,或采用独立的腿式移动方式,或轮-腿复合式,以保证良好的越障性能和较高的运动效率。图7所示为不同路面环境下移动系统的空间姿态。从图中可见,在一侧倾斜的地形上,该侧轮腿偏摆可保持车轮垂直路面;当行进于松软地面时轮腿偏摆至车轮侧面着地,增大与地面接触面积,防止沉陷,平台行进方式为腿式跨步行进;当地面崎岖不平时,可通过控制系统调整轮腿偏摆角度,以保持平台平稳前行。可以看出,无论在何种地形环境中平台均可保持稳定。

2.4 移动平台性能特点

由前面的分析可以看出,基于渐开线球齿轮的移动平台具有以下性能特点:(1)高机动性。平台能够以多种姿态移动,能够在狭小的空间里进行姿态调整,完成转向等动作。(2)多移动模式。由于路面环境复杂,既有平坦路面,也有松软崎岖的地形,还有不规则的、充满障碍物的地形,只有具有多种移动模式,才能保证平台对各种地形的适应性。(3)多步态。多步态能够保证平台以最简单的方式越过各种障碍。(4)稳定性高。平台采用主动式移动系统,可针对不同路面特征主动调整腿部姿态,始终保持车体平衡。

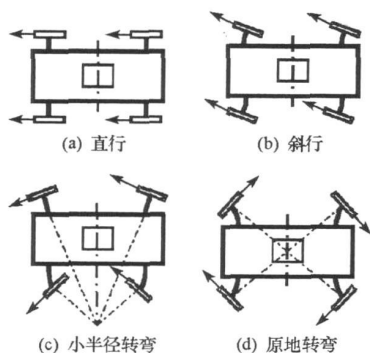


图 6 平地运动姿态

Fig. 6 The mobile poses on plane terrain

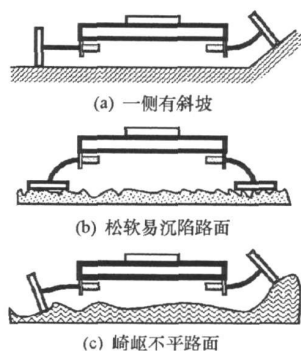


图 7 不同地形下运动姿态

Fig. 7 The mobile poses on rough terrain

3 运动仿真和物理样机实验

轮腿机构是实现移动平台复合运动功能的关键,对其进行运动学分析非常必要。由于轮腿机构属空间机构范畴,对其进行运动学建模是一项复杂的工作。即使建立了运动模型,面对冗长的公式也很难对其运动状态进行直观判断。而利用三维软件建立虚拟模型,基于模型开展分析是数字化设计的有效手段。因此,本文利用 SolidEdge 建立了轮腿系统的三维模型,对系统偏摆和自旋运动进行了仿真,以检查系统是否能够实现设想的运动姿态,并对运动中各构件是否存在干涉进行检测。图 8 为仿真结果。

在图 8 中,对轮腿机构由初始位置(a)向空间任意位置偏摆到极限状态(b),然后保持偏摆角度不变,系统作 360° 回旋,最终回到初始位置(f)的运动过程进行了仿真。仿真结果表明,轮腿能够实现全方位任意位置的偏摆运动,偏摆角度达到 90° 左右。同时,系统处于图 8 中任意一种位姿时,都能够保持空间姿态不变前提下进行自旋。说明该机构完全满足实现腿式行进和轮式行进所需要的运动形式。

将轮腿机构作为移动平台的单腿,末端安装车轮,采用四足式结构搭建的移动平台样机如图 9 所示。对该样机进行了姿态调整试验,试验结果表明,轮腿可实现偏摆、自旋及两者的组合。图中所示为样机的几个空间状态:直行、斜行、小半径转弯、原地旋转,试验结果和最初的设想完全一致,表明所提出的轮腿机构能够达到设计要求。

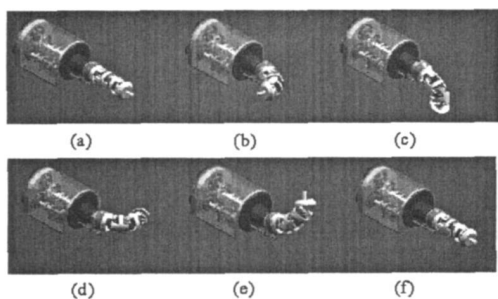


图 8 轮腿系统虚拟模型运动仿真

Fig. 8 The simulation using virtual prototype technology of the wheel leg hybrid mechanism

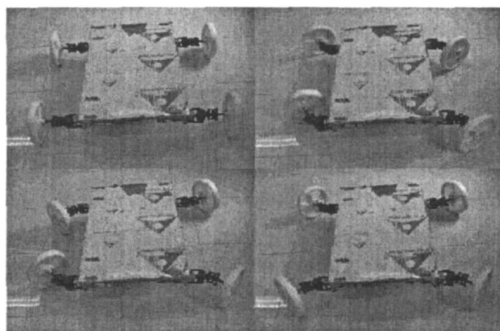


图 9 复合移动平台样机姿态调整试验

Fig. 9 The experiments of the locomotion platform

4 结论

总结了传统的轮-腿复合式移动平台的一些成果,对结构特点进行了分析,指出结构上存在的不足。提出了一种基于球齿轮机构的新型轮-腿复合式移动平台。分析表明,该移动平台具有优越的机动性和环境适应能力。平台良好的综合性能取决于它的轮腿机构,该机构在设计上具有独特特征。对轮腿机构进行了虚拟模型运动仿真,对移动平台样机进行了初步的姿态调整试验。仿真和样机试验结

果与设计意图完全一致,证明该轮-腿复合式移动平台的设计方案是可行的。

参考文献:

- [1] Huang B, Wang P F, Sun L N. Behavior based Control of a Hybrid Quadruped Robot[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006: 8997- 9001.
- [2] Wang P F, Huang B, Sun L N. Walking Research on Multi motion Mode Quadruped Bionic Robot Based on Moving ZMP[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada, 2005: 1935- 1940.
- [3] Endo, Hirose G. Study on Roller walker (multi mode steering control and self contained locomotion) [C]//Proceedings of the ICRA' 00. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Japan: Dept. of Mechano-aersp. Eng., Tokyo Inst. of Technol. 2000: 2808- 2814.
- [4] Adachi, Koyachi H. Development of a Leg wheel Hybrid Mobile Robot and Its Step passing Algorithm [C]//Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, Japan: Nat. Inst. of Adv. Ind. Sci. & Technol, 2001: 728- 733.
- [5] Hashimoto, Hosobata K, Sugahara T. Realization by Biped Leg wheeled Robot of Biped Walking and Wheel driving Locomotion [C]//Proceeding of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 2970- 2975.
- [6] Guccione S, Muscato G. The Wheelleg Robot [C]//Robotics & Automation Magazine, IEEE, Italy: Dipt. Elettrico Elettronico e Sistemistico, Universita Degli Studi di Catania, 2003: 33- 43.
- [7] Eiji N, Sei N. Legwheel Robot: A Futuristic Mobile Platform for Forestry Industry [C]//Proceedings of the 1993 IEEE/Tsukuba International Workshop on Advanced Robotics: can Robots Contribute to Preventing Environmental Deterioration, Sendai, Graduate Sch. of Inf. Sci., Tohoku Univ, 1993: 109- 112.
- [8] 潘存云, 温熙森. 球齿轮行星传动结构形式与驱动机构分析[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 93- 98.
- [9] 潘存云, 温熙森. 基于渐开线球齿轮的机器人柔性手腕结构与运动分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 141- 144.

(上接第 63 页)

参考文献:

- [1] 孙圣和, 陆哲明, 牛夏牧, 等. 数字水印技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Tirkel A Z, Rankin G A, Schyndel R. Electronic Watermark [C]//Digital Image Computing, Technology and Applications DICTA 93, Macquarie University, 1993: 666- 673.
- [3] Van Schyndel R G, Tirkel A Z, Mee N, et al. A Digital Watermark [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Austin, November 1994, 2: 86- 90.
- [4] Garimella A, Satyanarayana M V V, Kumar R S, et al. VLSI Implementation of Online Digital Watermarking Technique with Difference Encoding for 8-bit Gray Scale Image [C]//16th International Conference on VLSI Design, Jan. 4- 8, 2003: 283- 288.
- [5] Wu Q Z, Cheng H Y, Lin Y W, et al. Trustworthy Video Enforcement for Electronic Toll Collection [C]//Digest of technical Papers. International Conference on Consumer Electronics (ICCE' 2000), June 13- 15, 2000: 112- 113.
- [6] Wong P W. A Public Key Watermark for Image Verification and Authentication [C]//International Conference on Image Processing (ICIP' 98), Oct. 4- 7, 1998, 1: 455- 459.
- [7] Byun S C, Lee I L, Shin T H, et al. A Public key Based Watermarking for Color Image Authentication [C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME' 02), Aug. 26- 29, 2002, 1: 593- 596.
- [8] Lu Z M, Ge Q M, Niu X M. Robust Adaptive Video Watermarking in the Spatial Domain [C]//The 5th International Symposium on Test and Measurement (ISTM' 2003), Shenzhen, China, June 1- 5, 2003: 1875- 1880.
- [9] Kutter M, Jordan F, Bossen F. Digital Signature of Color Images Using Amplitude Modulation [C]//I. K. Sethi, R. Jain (Eds.), Storage and Retrieval for Image and Video Databases V, SPIE, San Jose, CA, February 1997, 3022: 518- 526.
- [10] Piva A, Bartolini F, Cappellini V, et al. Exploiting the Cross correlation of RGB channels for Robust Watermarking of Color Image [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Proceeding, Kobe, Japan, October, 1999, 1: 306- 310.
- [11] Tsai P Y, Hu Y C, Chang C C. A Color Image Watermarking Scheme Based on Color Quantization [J]. Signal Processing, 2004, 84(1): 95- 106.