

文章编号: 1003-8728 (2005) 04-0400-04

仿人机器人发展现状及其腰部机构研究

李艳杰^{1,2,3}, 赵铁军⁴, 谈大龙³, 吴镇炜¹, 钟 华^{1,2}

(¹中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院 研究生院, 北京 100039;

³沈阳工业学院 机械工程院, 沈阳 110168; ⁴沈阳工业大学 机械工程学院, 沈阳 110023)

李艳杰

摘 要: 仿人机器人目前已成为机器人领域的研究热点问题之一。本文对仿人机器人目前的发展现状进行了综述, 介绍了腰部机构在仿人机器人的作用以及具有不同结构特点的腰部机构。介绍了一种新型的两个自由度的并联差动驱动的腰部机构, 并进行了运动学分析及 PD 控制下的响应特性分析。实验结果表明, 该机构具有较快的响应速度和较好稳态精度。

关 键 词: 仿人机器人; 腰

中图分类号: P24 **文献标识码:** A

Development of Humanoid Robot and Study of Its Waist Mechanism

LI Yan-jie^{1,2,3}, ZHAO Tie-jun⁴, TAN Da-long³, WU Zhen-wei¹, ZHONG Hua^{1,2}

(¹ Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation,

Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;

³ College of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110168;

⁴ School of Mechanical Engineering, Shenyang Polytechnic University, Shenyang 110023)

Abstract: The humanoid robot is one of the most active domains in robotics. This paper summarizes the development of humanoid robot home and abroad. It discusses the functions of waist of humanoid robot and introduces the waist mechanisms with different structural characteristic. The paper especially introduces a kind of innovative 2-dof waist mechanism, which is driven by a parallel differential mechanism and analyses this mechanism's kinematics and its responding characteristic under PD control. The experimental results show that this mechanism has a good responding speed and static precision.

Key words: Humanoid robot; Waist

仿人型机器人是一种具有人的外形, 并能够效仿人体的某些物理功能、感知系统及社交能力并能承袭人类部分经验的机器人。仿人型机器人的研究目的不是企图制造以假乱真或替代人类的机械, 而是要创造一种新型工具, 它能在典型的日常环境中和人类交流, 在更广泛的环境任务中扩展人类的能力。仿人机器人不仅具有能走的双腿和双臂, 有头、眼、颈、腰等物理特征, 还能模仿人类的视觉、触觉、语言, 甚至情感等功能。这和能在特种环境下工作的服务机器人是有区别的。

目前仿人机器人的研究已经成为机器人学研究的热点, 是多学科的交叉。中国科学院沈阳自动化研究所研制的轮式移动宜人机器人是一个仿人机器人技术研究平台,

它由正交轮式移动平台、腰部、双臂、躯干及头部组成, 共 21 个自由度, 其中腰部机构具有两个自由度, 利用两个差动轮系实现封闭式传动, 是一个创新性机构。

本文介绍了仿人机器人的发展现状, 分析了腰部机构在仿人机器人中的作用, 以及差动轮系驱动的轮式移动宜人机器人腰部机构的结构特点, 给出了腰部机构的运动学方程, 建立了基于 PC 机 Can 卡的网络控制系统, 并对该腰部机构的控制响应特性进行了实验研究。

1 仿人机器人的发展现状^[1~6]

日本的早稻田大学研究仿人机器人已有将近 40 年的历史, 并在 1973 年创建了世界上第一个仿人形机器人 WABOT-1。1992 年早稻田大学集中工业界、政府和学术界的力量开始了仿人机器人工程 (The Project Humanoid), 它的最终目标是开发能与人类分享信息和行为空间的机器人。1995 年, 该工程生产了第一个名为 Hadaly-1 的样机, Hadaly-1 能综合视听信息, 声音对话和姿态运动与人进行

收稿日期: 2003-06-24

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目 (2001AA422170) 资助

作者简介: 李艳杰 (1969-), 女 (汉), 辽宁, 博士研究生

E-mail: yjli@sia.ac.cn

几个基本的信息互动。1997年,早稻田大学又集成了工程前期的技术,开发了两个新的仿人机器人,命名为 Hadaly-2 和 Wabian (Waseda bipedal humanoid) (图 1)。Hadaly-2 的下肢移动机构是车体,它综合视觉环境认知、对话能力、姿态行为实现与人类的信息交互;WABIAN 是一个全面具有人体构造的机器人。它能用双腿步行,能携带物体,具有信息交互能力。早稻田大学的仿人机器人的最新成果是 Wendy (Waseda engineering designed symbiont)。它是在提高 Hadaly-2 的每个子系统的基础上发展而来,能更好地实现人与机器人的交互,Wendy 还把安全性 (冲击和碰撞时的安全) 和可操作性 (移动性和灵活性) 作为基本要求,它能完成从地板上拿起物体及打鸡蛋等任务。

日本的 Honda 公司的仿人机器人工程开始于 1986 年,经过十年的秘密研究,P2 在 1996 年一经问世,便令世人瞩目。P2 是世界上第一个无缆仿人机器人,它能走,能上下台阶,能推小车。P3 是 P2 的改进,减小了尺寸 (重量由原来的 210 kg 降为 130 kg,高度由 1800 mm 降为 1600 mm,提高了步行能力。2000 年本田公司又推出了新型双脚步行机器人“A simo (Advanced step in innovative mobility)”,和“P3 相比,体形更小、重量更轻,并采用了新开发的技术“FWalking (Intelligent Realtime Flexible Walking) 实现更加自由的步行。2002 年 12 月 Honda 公司又推出了最新款的 A simo 智能仿人机器人 (图 2),它的主要特点是:

(1) 基于认知技术的先进的交流能力。它能实现移动物体认知、位置/姿态认知、环境认知、声音认知和面部认知。

(2) 网络集成能力。它能与用户网络系统相连完成用户指令,还能通过互联网为主人的问题寻找答案

更多的姿态和行为。Robovie 利用倒立摆机构实现在两轮基座上自平衡。使机器人能与不同高度的人谈话,能在说话时向后看,能通过移动腰来做幽默的姿势,能用手指指向特定物体。

SDR-3X (Sony Dream Robot-3X) 是日本索尼公司于 2000 年推出的紧凑型仿人机器人。500 mm 高、220 mm 宽、5 kg 重,24 个自由度,它除了能走以外,还能蹲下、起来、同步舞蹈,但它不能走上或走下台阶。2002 年该公司又推出了 SDR-4X 型机器人,它的自由度数达到了 38 个。它利用实时运动控制系统实现在像地毯类的弹性地面上行走,并保持平衡。SDR-4X 的视觉和声音认知能力也大有提高。

日本的 METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) 从 1998 年开始实施了一个为期五年的仿人机器人工程 (HRP)。HRP 采用基于平台的方法,即用第一阶段开发的平台作为第二阶段的基础框架。第二阶段的主要任务是为仿人机器人找到有前景的应用,为仿人机器人工业的批量生产铺路。HRP-2P 是在 HRP-2 平台下生产的仿人机器人样机,它在髋关节采用悬臂结构,增加两个自由度的腰关节等特殊机构,使它能在露天的粗糙地面上行走,并使得身体运动范围更大、稳定性更好。它的另一个显著特点是没有了后背的电池包。

美国麻省理工学院开发的 Cog 机器人只有上身,没有下肢,主要作为研究机器人的头脑智能、认知与感知、手臂的灵活性及柔顺型等的平台。

美国佛罗里达大学的机器智能实验室 (ML) 开发仿人机器人 Pneuman,作为人工认知、自然语言处理、轨迹规划、自动导航、人与机器人交互等的研究平台。

我国在仿人形机器人方面做了大量研究,并取得了很多成果。比如长沙国防科技大学研制成了双足步行机器人 (先行者号),北京航空航天大学研制成了多指灵巧手,中国科学院沈阳自动化所、哈尔滨工业大学、清华大学、北京科技大学也在这方面做了大量深入的工作。我国最新成果是北京理工大学于 2002 年 12 月推出的仿人机器人 BHR-1,它按照亚洲人的标准,身高 1.58 m,体重 76 kg。它全身有 32 个关节,使其活动起来比较自如,步幅为 0.33 m,速度为每小时 1 km。它还能打太极拳。

2 腰关节在仿人机器人中的作用 [7~13]

从生物学的角度来看,猴子有细长的腰,但它主要生活在树上;黑猩猩和大猩猩等大型灵长类动物像人类一样主要生活在陆地上,它们的髋关节和肩关节有很大的力量和运动范围,但却没有腰的灵活性,它骨盆上边和最下面的肋骨之间没有间隙。而人类在骨盆和肋骨之间有腰相连,使人类的脊骨可以带动上身弯曲、侧倾及扭转,使人类的活动有更大的移动性和灵活性,人类是有腰的唯一的灵长类动物。

在仿人机器人中加入腰,旨在提高机器人步行稳定性及在连续快速步行中让仿人机器人能像人类一样实现整个身体 (上肢、下肢及腰) 的协调动作,完成各种不同工作。

图 1 Wabian

图 2 Asimo

日本东京大学开发的 H6 和 H7,采用空间技术,它们具有低重量 (55 kg)、高强度的特点。H6 有 35 个自由度,它能走上和走下 25 cm 高的台阶,还能认识预存的人的面孔。

日本京都的先进通信研究所 (the Advanced Telecommunication Research Institute International or ATR) 开发了世界上第一个能在两轮基座上自平衡的仿人机器人。这一“Robovie 系列的机器人能实现人与机器人的对等交流。Robovie-II 增加了日常活动中交流行为的种类,能够表达

2.1 腰关节在连续稳定的动态步行中的作用

1990年早稻田大学的 Jin-ichi Yamaguchi et al提出了利用腰的两轴(俯仰和横滚轴)运动补偿在任意规划 ZMP(零力矩点)下的下肢运动产生的力矩实现双足动态稳定的快速步行的控制方法,平面步行速度可达 0.64 s/step,步长 0.3 m/step。实验发现,这种方法虽然实现了快速步行,但步行时在偏转轴产生的力矩使得机器人在偏转轴上有旋转,并成为影响步行稳定性的重要因素。而人类则不仅可以补偿俯仰轴和横滚轴的力矩还可以通过双臂的摆动和腰部的旋转来补偿偏转轴的力矩从而保持步行的整体稳定性。

1993年他们又提出了腰部的三轴力矩补偿的控制方法,并在机器人 WL-12RV上进行了实验研究,平面步行速度可达 0.54 s/step,步长 0.3 m/step。

2.2 腰在全身协调动态步行中的作用

1996年 Jin-ichi Yamaguchi et al通过研究双足步行仿人机器人整个身体(下肢、上肢和腰)的协调动态步行,得到了机器人的全身协调动态步行控制方法,该方法主要通过腰部的协调运动来补偿由任意规划下的下肢运动及手臂运动产生的三轴(俯仰,横滚和偏转轴)力矩。在仿人机器人 Wabian上进行的步行实验表明,可实现:

- (1) 手臂固定时的正常动态步行(前进及后退), 0.10 s/step ~ 0.15 s/step, 8.00 s/step ~ 1.28 s/step;
- (2) 动态舞蹈(向前、向后及摆臂);
- (3) 双臂动态持重物, 0.10 s/step ~ 0.15 s/step, 1.28 s/step, 负重 1.5 kg。

2.3 腰在有情感步行中的作用

人类的步行还能表达人类的情感,比如,人在高兴的时候,走路常有仰头、挺胸、脚步轻快;而在伤心的时候,常有低头、弯腰、步履缓慢等特征。双足步行机器人若能利用身体的运动来表达情感,将使仿人机器人更具亲和力,易于与人类交流。Atsuo Takanishi以 Wabian-R II进行步行机器人有情感步行的实验研究。不同情感状态下选择头、臂、腰的不同运动参数,得到不同的步态特征,步行前根据这些参数来规划下肢、腰和头的运动模式,计算腰部的补偿运动以实现稳定的有情感步行;步行中利用程序控制每个情感步行模式。此外,腰关节在扩大机器人工作空间中也起到了重要的作用。

2.4 腰在轮式仿人机器人中的应用

机器人 Wendy的机械结构由头、腰、车和手指等几部分组成,它的腰关节(图3)由一个旋转轴(关节1)和两个侧倾轴(关节2和关节3)。通过关节2和3的反向旋转,实现弯腰但不倾倒,它可以扩展垂直面上的工作空间,可以增加整个身体的冗余度,有效地抑制人机接触时的冲击力。

机器人 Robovie是基于同轴两轮倒立摆的移动机构,它具有3个自由度的腰关节,第一个关节用于扭转上身,使 Robovi-III不用在地面上移动就可以向四周看;第二个关节用于实现上身的侧倾;第三个关节是平行连杆机构实现上身的前后俯仰。腰关节的组合运动能够抵消上身运

动引起的中心变化,还可以实现在不平路面运动过程中保持上身直立向上。

图3 Wendy的腰关节

中国科学院沈阳自动化所的轮式移动仿人机器人的腰部机构采用新颖的并联差动驱动机构(图4),可以实现双电机驱动仿人机器人的俯仰或侧倾的单独运动,又可以实现俯仰和侧倾的复合运动。还具有电源消耗低,降低中心,提高稳定性的特点。

图4 并联差动驱动腰部机构

3 腰部机构的运动学分析^[14,15]

该腰部机构本质上是串联机构形式,依据串联机构末端连杆的位姿与关节变量之间的关系,建立腰部机构运动学方程,即

$$\begin{bmatrix} {}^0_2R & {}^0P_{20} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_1 \cos q_2 & -\cos q_1 \sin q_2 & -\sin q_1 & l \cos q_1 \\ \sin q_1 \cos q_2 & -\sin q_1 \sin q_2 & \cos q_1 & l \sin q_1 \\ -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 0_2R 为腰部末端的姿态矩阵; ${}^0P_{20}$ 为腰部末端的位置矩阵; q_1, q_2 为侧倾和俯仰的关节变量; l 为腰部高度。

根据差动轮系的运动特点,差动轮系输出轴的速度,就是侧倾和俯仰运动的关节速度,即

$$\dot{q}_1 = \frac{1}{i} |\omega_n + \omega_{I2}| \quad (2)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{1}{i} |\omega_n - \omega_{I2}| \quad (3)$$

式中: ω_n, ω_{I2} 分别为驱动电机 I_1 和 I_2 的转速; i 为传动比。

4 腰部机构性能测试与分析

为对腰部机构实施控制并对腰部机构的运动及控制性能进行实验研究,建立了基于PC机CAN卡的实验平台,该平台的硬件结构主要由PC机、基于CAN卡的总线控制器及两个基于单片机的关节控制器、带光电编码器的伺服电机、PWM功率放大器、A/D转换等组成。

对两关节电机实施速度的P控制+位置P控制策略,电机输出轴的角位移由增量式光电编码器获得,速度由位移的微分求得。为获得腰部机构末端的响应特性,在该机构的末端安装了两个倾角计,分别用于测量腰部机构俯仰和侧倾运动的实际空间角度值。利用该网络控制平台,对腰部机构的实时响应特性进行了实验研究。图5为其中一个关节电机的速度响应曲线;图6为俯仰位置响应曲线。

图5 伺服电机速度阶跃响应曲线

图6 俯仰位置响应曲线

实验结果表明,合理选择控制器参数,该腰部机构的速度阶跃响应的上升时间可达60ms,响应速度较快,空间位置跟踪误差可达 0.2° 。

5 结论

在双足步行仿人机器人中加入腰关节,利用腰来补偿机器人下肢及上肢运动在两轴或三轴的不平衡力矩可以实现机器人动态的、稳定的、连续的、快速的步行运动,还可以使机器人完成带感情的步行。腰的补偿作用可以使机器人的上身变的“柔软”,从而使机器人的步态更柔顺。腰在轮式移动中的主要作用是给机器人的手臂增加了冗余度,扩大了仿人机器人的工作范围。

并联差动驱动腰部机构本质上是并联驱动方式的串联机构,该机构的主要特点是减少了仿人机器人的电源消耗,降低了仿人机器人的中心,提高了系统的运动稳定性。实验表明,该机构具有良好的动态响应特性及稳态特性。但对该机构在大负载下的动态特性以及在仿人机器人的协调动态运动中的控制作用还需深入研究。

[参考文献]

- [1] Hashimoto S, et al. Humanoid robots in Waseda university—Hadaly-2 and Wabian [J]. *Autonomous Robots*, 2002, (12): 25~38
- [2] Hirai K, et al. The development of Honda humanoid robot [A]. *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [C], 1998: 1321~1326
- [3] Kagami S, et al. Design and implementation of software research platform for humanoid robotics: H6 [A]. *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [C], 2001: 2431~2436
- [4] Kaneko K, et al. Design of prototype humanoid robotics platform for HRP [A]. *Proc. Of the 2002 IEEE/RSJ International Conference Intelligent on Robots and System* [C], 2002: 2431~2436
- [5] Norman S, et al. Penuman: a humanoid robot implementation [A]. *Florida Conference on Recent Advances in Robotics (FCRAR)* [C], 2002
- [6] Brooks R A, et al. The Cog project building a humanoid robot [A]. *Computation for Metaphors, Analogy, and Agents* [M], Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, 1999: 52~87
- [7] Hun-ok lin, Takanishi A. Realization of continuous biped walking [A]. *Proc. of the 2001 IEEE on Systems, Man, and Cybernetics* [C], 2001: 1630~1635
- [8] Jin-ichi Yamaguchi, et al. Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion [A]. *Proc. of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [C], 1993: 561~566
- [9] Jin-ichi Yamaguchi, et al. Development of a bipedal humanoid robot—control method of whole body cooperative dynamic biped walking [A]. *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [C], 1999: 368~374
- [10] Hun-ok Lin, et al. Basic emotional walking using a biped humanoid robot [A]. *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* [C], 1999: 954~959
- [11] Miwa H, Umetsu T. Robot personality based on the equations emotion defined in the 3D mental space [A]. *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C], 2001: 2602~2607
- [12] Nagakubo A, et al. Development of a high-performance upper-body humanoid system [A]. *Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (ICRS)* [C], 2000
- [13] Kanehiro F, et al. Developmental methodology for building whole body humanoid system [A]. *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conf on Intelligent Robots and Systems (ICRS)* [C], 1999
- [14] 赵铁军,赵明扬,单光坤等. 仿人机器人柔性腰部机构研究 [J]. *机器人*, 2003, (2)
- [15] 赵铁军. 仿人机器人腰臂机构综合与建模研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2003