

DOI: 10.3901/JME.2009.03.071

# 仿人机器人发展及其技术探索\*

于秀丽 魏世民 廖启征

(北京邮电大学自动化学院 北京 100876)

**摘要:** 仿人机器人是研究人类智能的高级平台,它是综合机械、电子、计算机、传感器、控制技术、人工智能、仿生学等多种学科的复杂智能机械,目前已成为机器人领域的研究热点问题之一。对国内外仿人机器人研究现状进行广泛调研,其中日、美等国在研制仿人机器人方面做了大量的工作,中国各高校也积极研究,取得了突破性进展。概括并分析机器人自由度配置、步态规划的分类、基于零力矩点的稳定性判据、传感器的分类和应用以及机器人控制系统等关键技术。

**关键词:** 仿人机器人 自由度 步态规划 零力矩点

**中图分类号:** TP242

## Development and Technology Research of Humanoid Robot

YU Xiuli WEI Shimin LIAO Qizheng

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** Being an advanced platform for researching human intelligence, the humanoid robot is complex and intelligent machinery integrating mechanics, electronics, computer, sensors, control technology, artificial intelligence, bionics and other disciplines. The humanoid robot has now become hot issues in the field of robot research. The domestic and foreign research status of humanoid robot is widely surveyed. A lot of research work on humanoid robot has been done in Japan and America. Meanwhile, Chinese universities are making active research and have made breakthrough progress. The configuration of freedom of humanoid robot, the classification of gait planning, the stability criteria based on zero moment point, the classification and application of sensors and robot control system are summarized and analyzed.

**Key words:** Humanoid robot Degree of freedom Gait planning Zero moment point

## 0 前言

机器人是近年来发展起来的一个多学科和技术相交叉结合的应用领域。它集中了机械、电子、计算机、材料、传感器、控制技术、人工智能、仿生学等多门科学于一体,代表着一个国家的高科技发展水平,是目前科技发展最活跃的领域之一。

机器人起源于遥控操作器和数控机床,二战期间,为处理放射性材料研制出了遥控的主从式操作器(连杆机构)。1949年,由于研制新型飞机时零件加工的需要,美国空军发起了对数控铣床的研制。1953年,美国麻省理工学院研制出数控铣床(伺服

技术与数字技术的结合)。机器人在遵循“机器人学三定律”的前提下快速发展。

(1) 机器人不得伤害人,也不得见人受到伤害而袖手旁观。

(2) 机器人应服从人的一切命令,但不得违反第一定律。

(3) 机器人应保护自身的安全,但不得违反第一、第二定律<sup>[1]</sup>。

目前机器人已从军事、航天、工业等领域走入人们的日常生活,本田和索尼公司推出的双足行走的仿人机器人标志着机器人研究领域新时代的开始。仿人型机器人具有腿部的行走、手、腰和头的运动功能,自由度比两足步行机器人成倍地增加,与此同时,带来了控制规划、动力学、运动学上更为复杂的问题。此外,还有摄像处理、语音处理以及一系列传感信号的处理。可见,仿人型机器人对

\* 国家自然科学基金(50875027, 50775012)和国家高技术研究发展计划(863计划, 2007AA04Z211)资助项目。20080308收到初稿, 20081017收到修改稿

各项技术领域提出了更高的要求。

## 1 仿人机器人的发展现状

### 1.1 日本的发展现状

仿人机器人开始于 20 世纪 60 年代的双足步行机器人, 迄今已成功研制出的各种能静态或动态步行的双足机器人样机及在双足机器人领域理论研究上的成果推动了仿人机器人的快速发展。加藤一郎于 1973 年, 从工程角度研制出世界上第一台真正意义上的仿人形机器人 WABOT-1, 如图 1 所示。WABOT-1 可用日语与人交流, 实现静态行走, 可依据命令移动身体去抓取物体。1980 年出现 WL-9DR(Dynam's Refined) 双足机器人, 该型机器人采用预先设计步行方式的程序控制方法, 用步行运动分析及重复试验设计步态轨迹, 用以控制机器人的步行运动。该机器人采用以单脚支撑期为静态、双脚切换期为动态的准动态步行方案, 实现步长 45 cm, 每步 10 s 的准动态步行。1984 年出现的 WL-10RD 双足机器人, 实现了步幅 40 cm、每步 1.5 s 的平稳动态步行<sup>[2]</sup>。1986 年, 加藤实验室又成功研制了 WL-12 步行机器人, 该机器人通过躯体运动来补偿下肢的任意运动, 在躯体的平衡作用下, 实现了步行周期 2.6 s、步幅 30 cm 的平地动态步行。



图 1 WABOT-1

经过 10 年之久的研究工作, 1996 年 11 月, 日本 HONDA 公司首次展示了研制成功的第一台仿人机器人 P2(图 2), 它成为世界上第一台人性化自主双腿步行机器人<sup>[3]</sup>。采用无线化操作, 在体内安装了计算机、电动驱动装置、电池、无线接收装置等部件, 不仅能够更加自在地步行, 还能完成上下楼梯、推车等有一定难度的动作。1997 年 10 月 HONDA 公司又推出了仿人形机器人 P3, 它是一台完全自立的人性化双腿步行机器人, 由于采用了分散控制技术, 成功实现了机器人的小型化和轻量化。在此基础上, ASIMO(图 3)才得以诞生, 2004 年 12 月 15 日, 日本本田技研工业株式会社推出了新一代“ASIMO”机器人, 它是世界上首批遥控式双足直

立行走机器人, ASIMO 的最大进步在于能够像人类那样连续自主步行。



图 2 P2



图 3 ASIMO

日本科研人员通过引进智能实时自在步行(Intelligent realtime flexible walking, I-WALK)技术, 可以更加自由地步行, 使 ASIMO 可以完成转换方向时的连续动作, 进一步提高了处理突发动作的稳定性。“I-WALK”技术在地面反作用力、目标零力矩点(Zero moment point, ZMP)、着地位置等双足步行技术的基础上, 增加了对预测运动的控制, 它可以实时预测下一个动作, 并且事先移动机器人的重心来改变步调。通常人在直线步行过程中绕过一个小角度拐角的时候, 会事先将身体重心移到拐角的内侧, 以防身体向外侧跌倒。同样, 通过计算步行过程中拐弯时身体重心变化的预测值, 能确保机器人拐弯时的稳定性。除了步行之外, ASIMO 的手臂动作范围扩大。通过将肩关节的安装角度扩大了 20°, 手臂的活动高度最大可达 105°。类似人类的五个手指使得抓取东西变得更加容易。

### 1.2 法国的研究现状

法国自动化研究和法国 Laboratoire de Mecanique des Solides 实验室共同开发一种具有 15 个自由度的双足步行机器人, 建立了一整套具有适应未知条件行走的双足机器人系统, 于 2000 年 3 月开发研制出 BIP2000 样机<sup>[4]</sup>, 主要研究实时控制理论及其实际应用、极限环、稳定性、建模与优化控制等问题, 并结合仿生技术, 分析参考人类行走的统计数据结果来规划步态数据。采用分层递阶控制结构策

略,包括全局规划层、步态规划层、控制实现层,实现站立、行走、上下斜坡和上下楼梯。

### 1.3 美国的研究现状

美国 Ohio 大学的 ZHENG 等于 1990 年提出用神经网络来实现双足步行机器人动态步行,并在 SD 双足步行机器人上得以实现。麻省理工学院的 PRATT 等在 Spring Turkey、Spring Flamingo 双足机器人的控制中提出了虚模型控制策略。从本质上说,虚模型控制实际上是一种运动控制语言,即假想将诸如弹簧振子、阻尼器等元件固连在机器人的系统中用来产生假想的驱动力矩。采用虚模型控制,可以有效地避免繁琐的机器人逆运动学和动力学的计算。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性等的平台。美国佛罗里达大学的机器智能实验室开发仿人机器人 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。

### 1.4 国内的发展现状

相比国外而言,我国从 20 世纪 80 年代中期才开始研究双足步行机器人。国防科技大学在 1988~1995 年间,先后研制成功平面型 6 自由度双足机器人 KDW-I,空间运动型 KDW-II 和 KDW-III。KDW-III 下肢有 12 个自由度,最大步距为 40 cm,步速为 4 s/步,可实现前进/后退和上/下台阶的静/动态步行和转弯运动。2000 年 11 月 29 日,国防科技大学又研制出我国第一台类人型双足步行机器人“先行者”(图 4),高 1.4 m,质量 20 kg,可实现前进/后退、左/右侧行、左/右转弯和手臂前后摆动等各种基本步态,行走频率为 2 步/s,能平地静态步行和动态步行。



图 4 先行者

哈尔滨工业大学 1985~2000 年研制出双足步行机器人: HIT-I、HIT-II 和 HIT-III。HIT-III 实现了步距 200 mm 的静态/动态步行,最快步行周期为 3.2~4.0 s/步,能够完成前/后、侧行、转弯、上下台阶及上斜坡等动作。

上海交通大学于 1999 年研制的仿人形机器人 SFHR,腿部和手臂分别有 12 和 10 自由度,身上有 2 自由度,共 24 自由度,实现了周期 3.5 s、步长 10 cm 的步行运动。机器人本体上装有两个单轴陀螺和一个三轴倾斜计,用于检测机器人的姿态信息,并配备了富士通公司的主动视觉系统,是研究通用机器人学、多传感器集成以及控制算法良好的试验平台。

北京理工大学于 2002 年 12 月研制出仿人机器人 BRH-1(图 5),高 158 cm,质量 76 kg,32 自由度,步幅 0.33 m,步速为 1 km/h,能根据自身的平衡状态和地面高度变化实现未知路面的稳定行走和太极拳表演。此后又在此基础上研制成了“汇童”机器人,它高 160 cm,质量 63 kg,它是具有视觉、语音对话、力觉、平衡觉等功能的拟人机器人。“汇童”的成功研制标志着我国在拟人机器人的研制方面取得了突破性进展,是继日本之后成为第二个掌握集机构、控制、传感器、电源于一体的国家。

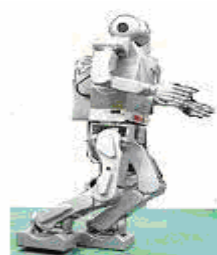


图 5 BRH-1

清华大学于 2002 年 4 月 9 日研制出具有自主知识产权的仿人机器人 THBIP-I(图 6)样机。THBIP-I 共 32 自由度,采用独特传动结构,成功实现无缆连续稳定地平地行走、连续上下台阶行走以及端水、太极拳和点头等动作<sup>[5]</sup>。其平地行走速度为 4.2 m/min,步距为 0.35 m,跨越台阶高度 75 mm,跨越速度 20 s/步。并在仿人机器人机构学、动力学及步态规划、稳定行走理论、非完整动态系统控制理论与方法,以及总线通信、嵌入式系统、微电动机驱动、自载电源、环境感知技术等方面取得了一些创新成果和突破性进展。



图 6 THBIP-I

各国的双足机器人经历了由少自由度到多自由度、由实现简单动作到复杂动作、由简单功能到仿生复杂功能、由静态步行到动态步行、由类人下肢到完全仿人的较为系统全面的研究和发展过程,同时有力促进了仿人机器人的研究工作进展。

## 2 仿人机器人稳定行走的技术挑战

仿人机器人从工程角度来模仿人类固有的动态行为,如步行、学习功能等,有诸多问题需要解决。国内外研究者们已针对仿人机器人的稳定行走问题,从自由度配置、运动学建模、动力学分析、稳定性判据、步态规划、地面碰撞、控制系统、驱动方式、传感器系统等多方面,进行了大量研究。

### 2.1 自由度配置及动力学模型

SARDAIN 指出仿人机器人的步行能力在很大程度上依赖于机械结构(自由度)的运动学特征<sup>[6]</sup>。大多数样机按照“功能仿生”思想设计机构,结合考虑基本步行功能,配置自由度,并将机器人简化为二维平面杆件模型或三维块状模型,然后依据 D-H 法则建立机器人坐标系统,进行运动学分析。连杆坐标系的 3 条基本 D-H 法则如下。

(1) 旋转关节  $i$  的运动轴线与  $z_{i-1}$  相重合。

(2)  $x_i$  轴在从  $z_{i-1}$  轴指向  $z_i$  轴的公共法线的延长线上。

(3)  $y_i$  轴按照右手法则  $y_i = z_i \times x_i$  确定,坐标原点取  $x_i$  和  $z_i$  的交点。

HONDA 和 SONY 的仿人机器人下肢自由度配置为:髋关节 3 个(前摆、侧摆和旋转)、膝关节 1 个(前摆)和踝关节 2 个(前摆和侧摆)。

多数仿人机器人样机基于多刚体动力学建立数学模型,采用方法有:拉格朗日—欧拉法、牛顿—欧拉法、广义达朗贝尔法、凯恩方法、旋量(对偶数)方法和罗伯逊—魏登堡方法等。通过对上述方法及其简化方法的研究,从基于模型的行走控制角度分析,机器人的动态性能直接取决于动力学模型和控制算法的效率,这些方程形式虽不同,但本质上是等价的。

### 2.2 仿人机器人步态规划

仿人机器人步态模式可分为静态步行、准动态步行和动态步行。在静态步行中,机器人的质心在地面上的投影始终不超越支撑多边形的范围;而在动态步行中,质心的投影在某一时刻可以超越支撑多边形。研究表明,动态行走时关节驱动力矩较静态行走时小,是仿人机器人研究的必然发展方向和实现目标。仿人机器人步态规划不仅取决于地面条

件、下肢结构、控制的难易程度,而且必须满足运动平稳性、速度、机动性和功率等要求。

### 2.3 传感器技术

为提高仿人机器人的智能化,仿人机器人中安装了大量的传感器,如力传感器、力矩传感器、陀螺仪、视觉传感器、接近觉传感器、声学传感器等多种传感器。一些机器人样机采用压力传感器或力矩传感器获得部分地面反力测量值,再通过数学模型计算实际 ZMP。而六维力/力矩传感器具有可以同时测量 3 自由度力和 3 自由度力矩的优越性,使得常被安装在机器人脚底用于测量地面反力。另外,仿人机器人在运动过程中,须靠位置传感器检测关节位置和位移,陀螺传感器采集整个身体姿态信息。机器人的控制从某种程度上,可以说是基于传感器的控制。而目前市面上出售的传感器尤其是国内的,精度很不理想,而国外的精度高的传感器价格又非常昂贵,并且传感器精度还远远达不到人类或某些动物的“感觉”精度。

### 2.4 稳定性判据

1972 年, VUKOBRATOVIC 等<sup>[7-8]</sup>在一篇关于仿人机器人控制的论文中定义了 ZMP。当机器人处于动态平衡时,是地面上一点重力与惯性力的合力关于该点的力矩沿水平面内的两个垂直轴方向的分量为零。若机器人在行走过程中, ZMP 始终位于支撑区域内(不包括边界),则步行稳定。这一条件也是多数机器人步态规划遵循的基本原则。在仿人机器人研究中,此定义被用作重要的静态、动态行走稳定性判据,如 HONDA 的 P2、P3、ASIMO 以及 SONY 的 SDR-3X/4X。

### 2.5 仿人机器人控制系统

控制系统作为机器人的大脑和神经系统,根据指令和传感信息控制机器人本体完成一定动作和作业任务,在很大程度上决定机器人性能的优劣。

从计算机结构和控制方式来划分,机器人控制系统的发展和实现方式大致有四种:单 CPU 结构、集中控制方式;二级 CPU 结构、主从控制方式;多 CPU 结构、分布控制方式;并行处理结构、分布式控制方式<sup>[9]</sup>。典型仿人机器人 P2 基于 VME(Versa Module Eurocard)总线的集中式控制系统。P3 采用分布式控制系统,组成局域网的控制计算机分布在相应关节。ASIMO 基于压缩 PCI 总线设计的分布式控制系统。SDR-3X/4X 基于开放式串行总线 OPEN-R 技术开发。CRONIN 等则采用递阶分布式控制系统<sup>[10]</sup>。可见,仿人机器人的控制系统从基于插卡式的集中控制,逐渐发展到结合集中式和分布式的优点,采用并行处理结构技术和开放式串行总

线的分布式控制<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

仿人机器人是能够与人相互影响的最理想的机器人, 它能够通过与环境的交互不断获得新知识, 而且还能用它的设计者根本想象不到的方式去完成各种任务, 它会自己适应非结构化的、动态的环境。开展仿人型机器人研究, 不仅能够促进机械电子、传感控制、人工智能等多学科发展, 而且将大大提高我国机器人技术的系统集成能力和控制水平。通过提高机器人的智能化、机动性、可靠和安全性以及与人类环境的完美的融入性, 使得仿人机器人融入人类的生活, 和人类一起协同工作, 从事一些人类无法从事的工作, 以更大的灵活性给人类社会带来更多的价值。

#### 参 考 文 献

- [1] 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧, 等. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.  
XIONG Youlun, DING Han, LIU Encang, et al. Robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [2] 谢涛, 徐建峰, 张永学, 等. 仿人机器人的研究历史、现状及展望[J]. 机器人, 2002, 24(4): 267-374.  
XIE Tao, XU Jianfeng, ZHANG Yongxue, et al. History, current state and prospect of study of humanoids[J]. Robot, 2002, 24(4): 267-374.
- [3] 李艳杰, 徐继宁, 王侃. 仿人机器人发展现状及其腰关节的作用[J]. 沈阳工业学院学报, 2004, 23(1): 18-23.  
LI Yanjie, XU Jining, WANG Kan. Development of humanoid robot and its function of waist joint[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 2004, 23(1): 18-23.
- [4] ESPIAU B, SARDAIN P. The anthropomorphic biped robot BIP2000[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation, April, 2000, San Francisco. USA: IEEE, 2000: 3 396-4 001.
- [5] 满翠华, 范迅, 张华, 等. 类人机器人研究现状和展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 204-207.  
MAN Cuihua, FAN Xun, ZHANG Hua, et al. Current status and future development of humanoid robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 204-207.
- [6] PHILIPPE S, MOSTAFA R, GUY B. An anthropomorphic biped robot: dynamic concepts and technological design[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 1998, 28(6): 823-838.
- [7] 梶田秀司. 仿人机器人[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
SHUUII Kajita. Humanoid robots[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [8] VUKOBRATOVIC M, STEPANENKO J. On the stability of anthropomorphic systems[J]. Mathematical Biosciences, 1972, 15: 1-37.
- [9] 钟华, 吴镇炜, 卜春光. 仿人机器人控制系统的研究与实现[J]. 机器人, 2005, 27(5): 454-459.  
ZHONG Hua, WU Zhenwei, BU Chunguang. Research and implementation of a humanoid robot control system[J]. Robot, 2005, 27(5): 454-459.
- [10] LUH J Y S, ZHENG Y F. An interactively hierarchical control scheme for two coordinating industrial robots[C]// Proceedings of 25th Conference on Decision and Control, December, 1986, Athens, Greece. IEEE, 1986: 1 265-1 266.

作者简介: 于秀丽, 女, 1975年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人技术。

E-mail: alicexiuli@163.com

魏世民, 男, 1965年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、机器人虚拟设计、移动机器人测控技术。

E-mail: wsmly@bupt.edu.cn

廖启征, 男, 1947年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学和机器人学。

E-mail: qzliao@bupt.edu.cn