

文章编号: 1002-0446(2002)03-0262-06

THBIP-I 拟人机器人研究进展*

刘 莉 汪劲松 陈 恳 杨东超 赵建东

(清华大学精密仪器及机械学系 北京 100084)

摘 要: 清华大学 THBIP-I 拟人机器人研究项目, 由精密仪器系、机械工程系和自动化系组成研究小组进行系统研究, 其研究目的是发展先进机器人理论和技术, 开发自主式拟人机器人样机。THBIP-I 机器人是具有头、手臂、躯干、腿和脚的拟人机器人, 共 32 个自由度, 并具有视觉及语音识别等智能功能。结构设计方面, 由直流无刷电机、滚珠丝杠、曲柄连杆机构、谐波减速器组成, 各驱动关节轴独立运动。控制系统分三层: 组织层、协调层、执行层, 分别完成任务规划、关节协调运动控制、关节伺服控制等任务。传感系统由关节位置检测、地面反力检测、姿态检测、视觉系统、语音识别系统组成。电源系统采用机载电池系统供电。本文将介绍 THBIP-I 机器人研究进展。

关键词: 拟人机器人; 两足; 自由度; 分布式控制; 传感

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

THE RESEARCH ON THE BIPED HUMANOID ROBOT THBIP-I

LIU Li WANG Jin-song CHEN Ken YANG Dong-chao ZHAO Jian-dong

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: This paper describes the progress of the THBIP-I biped humanoid robot. Because the project covers mechanical design, control studies, sensor system and computer architecture integration, three departments of Tsinghua University are involved from last year. It is aimed at the implementation of biped humanoid robot. The THBIP-I robot includes a head, two arms, a trunk, two legs and two feet, totally 32 DOFs. Vision system and voice identification system is located in the head, in view of improving human-robot interactions. The joint frame consists of DC brushless motor, screw-nuts, cranks and harmonious transmitters. Every joint can move separately. Control system consists of three layers, those are organizing control layer, correspond control layer and servo control layer, to realize task planning, joint coordination control and joints servo control. Sensor system is equipped with joint potentiometer, 6-axis force sensor, 3-axis gyro and 3-axis accelerometer, two cameras and voice identification system. Rechargeable battery inside the robot is used as power supply.

Keywords: humanoid robot, biped, degree of freedom, distributed control, sensing

1 引言(Introduction)

移动机器人是机器人学中非常活跃的领域, 移动方式有轮式、履带式、步行、爬行、蠕动等方式。步行是大多数高等动物共同采用的移动方式, 对环境具有很强的适应性, 既可以进入相对狭窄的空间, 也可以跨越障碍、上下台阶、上下斜坡、甚至在不平整地面上运动, 使得与上述各种移动方式相比, 具有更广阔的应用前景。步行机器人中主要包括双足、四足、六足和八足机器人等。与其它足式机器人相比, 双足机器人具有更高的灵活性, 因此具有自身独特

的优势, 更适合在人类的和生活和工作环境中与人类协同工作, 而不需要专门为其对环境进行大规模改造。此外, 将来社会环境的变化使得双足机器人在护理老人、康复医学以及一般家务处理等方面也具有很大的潜力^[1,2]。

双足拟人机器人不但具有双足移动的特点, 还具有其它类人的智能特点, 如手臂运动功能、手抓取物体功能、视觉功能、语音功能、自主决策功能等等。因此, 是集机构学、机械设计、传感技术、控制理论与技术、计算机技术等多学科技术为一体的综合性技

术, 是智能机器人理论和技术的集中体现, 能够带动许多相关学科和技术的交叉发展和进步, 因此, 世界各先进国家和一流大学都投入了大量的财力、物力和人力, 积极开展该方向的理论、技术研究以及样机的研制, 以期通过高智能机器人的开发, 来完善和发展机器人技术, 并将其早日投入实际应用. 近年来, 由于制造技术、计算机技术、控制技术、传感技术、材料科学、动力系统以及信息技术的突飞猛进的发展, 使得研制高智能的拟人机器人成为可能.

要实现拟人机器人的高智能化, 其基础是机器人的双足行走能力和平衡能力. 因此, 双足步行机器人的研究是拟人机器人技术的基础. 目前, 国外拟人机器人研究中较成功的是日本本田公司的 P2, P3, ASIMO, 索尼公司的 SDR-3X, 早稻田大学的 WABIN. 其它如美国 MIT 的 M2, 法国 BIP2000 等的研究都处于双足步行研究阶段, 还未完全进入拟人机器人的智能研究阶段. 国内拟人机器人只有国防科技大学的“先行者”, 哈尔滨工业大学, 上海交通大学在双足机器人的研究领域也取得了一些进展.

纵观拟人机器人领域的研究状况, 具有以下特点:

(1) 拟人机器人的研究, 开始于双足步行机器人的研究. 双足步行理论和技术是其关键技术.

(2) 双足行走已从 2D 行走技术逐渐过渡到 3D 行走技术的研究, 其关键问题是平衡理论.

(3) 双足步行理论中比较成熟的是 ZMP 平衡理论, 其它平衡理论只在某些特定机器人中得到较好应用.

(4) 动力学模型中, 七杆模型描写双足步行机器人较为精确和实用, 并有很好的控制应用实例. 拟人机器人自由度较双足机器人要更多, 在建模方面还未有详细的公开文章, 只有日本早稻田大学曾将 WABIN 拟人机器人的动力学建模做过简单介绍.

(5) 智能技术在双足拟人机器人中的应用, 目前基本是手臂和手爪的操作, 视觉和语音识别等功能. 研究仍然处于初步阶段, 还未具有根据环境情况完全自主操作的能力.

鉴于目前拟人机器人领域研究情况, 清华大学“985”计划将“拟人机器人技术及系统”列入重点研究项目, 由精密仪器系、机械系和自动化系组成研究小组, 其目的是研究自主式拟人机器人理论与技术, 包括机构分析与综合、约束力学系统的运动稳定性理论、传感信息检测与融合、动态非线性系统控制理论与方法、动力与通讯技术、智能与计算机控制技

术、机器人仿真技术等, 并开发出拟人机器人样机, 包括关键部件及系统的开发. 本文将介绍 THBIP-I 拟人机器人理论研究与样机开发研究进展.

2 THBIP-I 拟人机器人(THBIP-I biped humanoid robot)

清华大学 THBIP-I 拟人机器人的研究始于 2000 年初, 目前已完成下肢部分的结构与传感控制系统开发, 上肢和头部正在制造中. 视觉与语音等智能研究同步进行, 已取得初步进展.

2.1 THBIP-I 拟人机器人自由度配置

美籍华人郑元芳博士从仿生学的角度对拟人机器人腿部自由度配置进行了研究^[3], 得出关节扭矩最小条件下的两足步行结构自由度配置. 他认为髋部和踝部各设置 2 个自由度, 可以使得机器人在不平的地面上站立, 髋部再增加一个扭转自由度, 可以改变行走的方向, 踝关节处加一个旋转自由度可以使得脚板在不规则的的表面落地, 膝关节上一个自由度, 可以方便的上下台阶. 所以从功能上考虑一个比较完善的腿部自由度配置是每条腿上 7 个自由度. THBIP-I 机器人基本按照以上分析设置自由度, 考虑到设计难度, 减少了踝部的一个旋转自由度. 对于机器人在平地、台阶和斜坡上行走没有太大的影响.



图 1 THBIP-I 拟人机器人自由度配置示意图

Fig. 1 DOFs distribution of THBIP-I

对于转弯而言, 踝部没有旋转自由度, 转弯需几步才可完成. 手臂和手采用 9 个自由度配置, 其中肩部 3 个, 肘部 1 个, 腕部 2 个, 手部 3 个. 该配置基本

能够满足机器人一般操作要求. 头部采用 2 个自由度, 可前后运动和旋转, 以使安装在头部的摄像机能够具有更大的扫描范围. 图 1 为 THBIP-I 拟人机器人自由度配置示意图.

THBIP-I 拟人机器人总重量为 130kg, 高为 170mm.

2.2 下肢关节结构设计

下肢机构是拟人机器人的重要组成部分, 也是拟人机器人能否实现仿人式双足步行及步行质量好坏的关键所在. 因此, 它对整个拟人机器人从结构到控制, 直至功能、质量和效率具有很大的影响. 下肢设计中关节结构是关键. 在研究拟人机器人的过程中, 国内外各研究机构都以人为对象, 从各种步态入手, 做了许多仿真实验, 因结构和所选步态、步速等的差异而使仿真实验结果有较大差别. 根据 THBIP-I 机器人结构参数对几种步幅、步速进行仿真, 获得的仿真曲线中, 转矩和功率曲线图可看成为多个正弦曲线的叠加, 取其中的曲线段即可. 因此, 关节结构如采用通常的同步带+谐波定减速比传动装置来实现关节运动, 则电机所要求输出的力矩和功率也将按类似曲线和趋势变化, 这将对电机的选取和使用造成一定的困难或浪费. 鉴于以上原因, THBIP-I 机器人下肢关节采用直流无刷电机、滚珠丝杠和曲柄连杆减速机构组成. 该结构的特点是具有可变减速比, 能够利用连杆的结构优点而使电机要求输出的力矩和功率曲线变化趋势趋缓, 以利于电机的选型及其性能的充分利用, 并且使结构紧凑, 体积小, 符合拟人机器人结构要求. 其变减速比能够传输大力矩、高速度, 满足于关节的动态控制要求. 图 2 为下肢结构外形图.

2.3 传感系统

双足步行机器人本质上是非线性、不稳定动态系统, 为了实现平滑稳定行走, 需要大量传感器进行在线检测, 以获得机器人与外部环境相互作用的信息, 从而实现动态控制. 拟人机器人是在双足步行机器人基础上增加了智能功能, 同样也需要智能传感器.

关节伺服是机器人运动的基础, THBIP-I 机器人选用瑞士 MAXON 直流无刷电机, 并选用与之配套的编码器作为位置和速度反馈, 减速机构采用滚珠丝杠、曲柄连杆机构, 该机构具有变减速比的特点, 更适合于行走时的动态控制. 为实现关节轴上的位置闭环控制, 在关节输出轴上安装了碳膜电位器.

作为双足步行机器人, ZMP 控制是目前应用比较成功的双足机器人平衡理论, 因此, 需检测和计算实际 ZMP 的位置. 同时摆动脚着地时与地面之间的冲击力, 对于运动过程的稳定性同样起着至关重要的作用, 因此, THBIP-I 机器人采用美国 JR3 公司的 IFS-105M 50A 220-163 六维力/力矩传感系统, 实现该项检测与计算, 该传感系统由传感器本体和 DSP 接口控制卡组成, 传感器本体安装在机器人脚内部, DSP 接口控制卡安装在上身内部, 与控制器相连.



图 2 THBIP-I 机器人外形图

Fig. 2 Mechanical architecture of lower part

机器人上身姿态可改变 ZMP 位置, 其运动速度和加速度直接影响机器人的平衡与稳定. THBIP-I 机器人采用三轴陀螺和三轴加速度计作为姿态检测传感单元, 安装在机器人上身内部. 三轴陀螺可直接检测上身角速度, 通过积分获得姿态角度信息, 三轴加速度可直接检测上身线加速度, 通过积分可获得线速度. 另外, 该姿态检测单元作为捷联式惯性导航系统的传感本体, 通过建立姿态解算数学平台可对拟人机器人进行导航, 使机器人具有自主能力.

视觉系统采用两个 Panasonic 公司 GP-KR651US 系列数字摄像头, 通过 USB 口与笔记本电脑连接, 视觉图像处理由笔记本电脑完成. 该视觉系统可完成机器人与周围环境的信息交换, 使手、眼、脚协调配合, 实现稳定行走. 视觉系统通过对被抓物体的识别, 可与手臂、手配合, 实现手爪的稳定抓取作业. THBIP-I 机器人还配置了语音识别系统,

可实现人-机交流。

2.4 控制系统

控制系统采用递阶、分布式系统结构。根据功能要求,将控制系统分为三层:组织层、协调层和执行层。

(1) 组织层:在机器人本体外,由一个工作站组成,完成用户界面、任务规划等功能;

(2) 协调层:在机器人本体内部,由一台笔记本电脑和两个 PC-104 嵌入式计算机系统组成。笔记本电脑通过 USB 口与两台摄像机连接,完成图像采集和图像处理等视觉功能;笔记本电脑通过无

线网卡完成与工作站间的通讯(即协调层与组织层间的通讯)。两个 PC-104 计算机系统中,一个负责双腿各关节的协调运动控制,另一个负责两臂各关节的协调运动控制。协调层的各计算机系统连成一局域网——相互通过以太网通讯。

(3) 执行层:由各关节的伺服控制电路(节点)及驱动器等构成。每个 PC-104 计算机与相关的执行层节点间通过 CAN 总线连接,组成分布式系统。

控制系统的难点在于既要体积足够小,满足机器人的自主式设计要求,执行速度又要足够快,满足步行等功能要求。图 3 为控制系统结构框图。

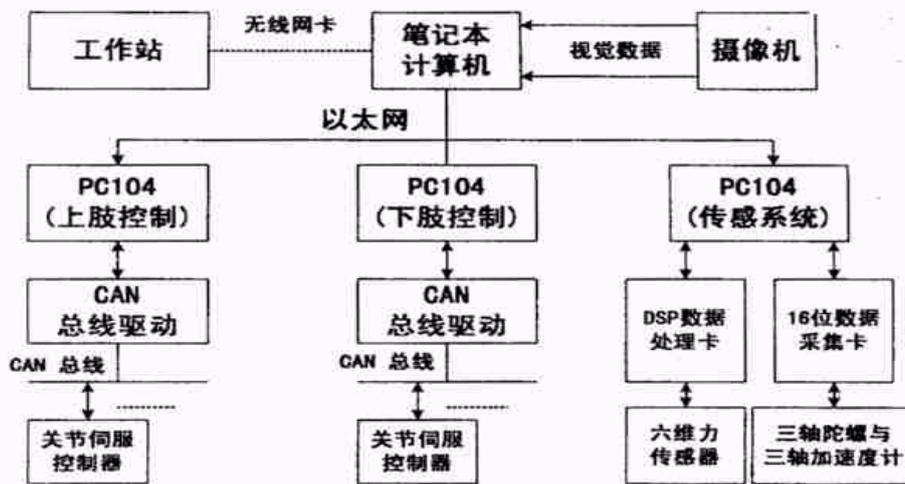


图 3 控制系统结构框图

Fig. 3 Structure of control system

2.5 电源系统

THBIP-I 拟人机器人为自主式机器人,采用机载电源供电方式,机器人无任何电缆与本体外部连接,所有控制系统硬件及软件均在机器人内部完成。因此,要求电源系统具有体积小,重量轻,连续工作时间长等特点。根据机器人各部分电压、功率要求,选用 NiMH 蓄电池作为机载电源。目前该系统正在制造中,实验采用的电源为阀式密闭铅酸蓄电池系统。

3 理论与仿真研究进展(Theory and simulation)

拟人机器人理论研究一直与 THBIP-I 样机同步进行。运动学、动力学、控制理论与方法是机器人

技术的三个重要基础理论。由于双足式拟人机器人本质上是非线性、不稳定系统,使得运动学、动力学、控制理论更加复杂。因此,该领域一直吸引着众多研究者。

3.1 运动学、动力学与步态规划

目前比较成熟的机器人学理论基本围绕操作臂的运动学、动力学进行,因此在建模上主要基于两种类型机器人:串联式机器人和并联式机器人。关于两足式拟人步行机器人具有普遍意义的建模方法研究很少。步态是指在步行运动过程中,步行体的身体各部位在时序和空间上的一种协调关系。步态规划就是给出机器人各关节位置与时间的关系。本课题根据 THBIP-I 机器人具体结构参数和自由度配置,采用 Denavit-Hartenberg 规则,建立了机器人运动学

模型. 为了有效地控制机器人实现动态行走, 采用递推 Newton-Euler 法, 建立了机器人动力学模型与方程. 动力学模型不仅用来计算关节的驱动力矩, 控制机器人的运动, 而且为步态规划过程提供了重要地依据.

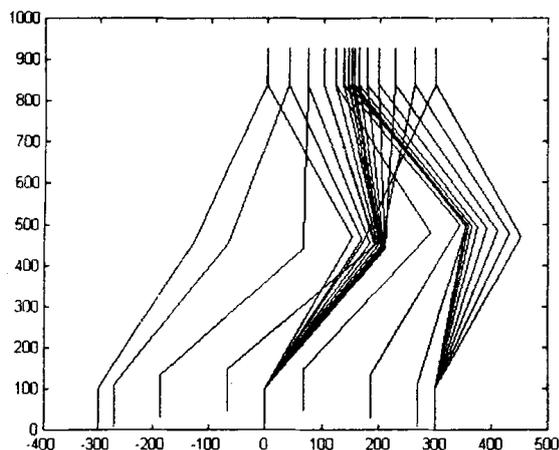


图 4 步态规划仿真结果

Fig. 4 Simulation result of gait planning

为了获得人类行走姿态和动力学数据, 本课题建立了人类行走测试实验台, 对人类行走姿态和规律进行了测试, 并根据测试结果, 对 THBIP-I 机器人进行了姿态规划, 并采用建立的运动学数学模型求解运动学反解, 规划出各关节角度轨迹, 并用建立的动力学模型计算了各关节驱动力矩, 以确定是否

满足动力学要求. 根据步态规划结果, 进行了仿真, 图 4 为步幅 300mm, 5s/step 的步态规划仿真结果.

3.2 平衡理论

两足行走机器人与一般意义上的机器人手臂有本质区别, 两足行走机器人控制的主要目标并不是运动中的精确性, 而是运动中的稳定性. 因此, 其平衡理论的研究更为重要. THBIP-I 机器人采用南斯拉夫学者 M. Vukobratovic 提出的 ZMP 平衡理论作为行走稳定判定条件, 即机器人重力和惯性力的合力延长线落在机器人的支撑面内.

3.3 控制理论与方法

THBIP-I 机器人采用离线规划、在线调整的方式, 即根据上述步态规划方法规划出各关节轨迹, 在实际行走中, 根据 ZMP 实际位置, 通过步态调整器, 调整步态, 使机器人始终保持动态平衡. 具体方法有三种:

1. 根据六维力/力矩传感系统数据, 调整上身姿态使期望 ZMP 到达恰当的位置, 使其与实际 ZMP 重合, 保证机器人的稳定行走.
2. 根据传感系统数据, 调整支撑脚姿态, 改变实际地面反力中心, 使实际 ZMP 达到恰当的位置, 与期望 ZMP 重合.
3. 根据传感系统数据, 同时调整上身姿态和脚着地姿态, 同时改变期望 ZMP 和实际 ZMP 的位置, 因此需要相应调整脚着地的位置, 即微调步幅, 实现期望 ZMP 和实际 ZMP 重合, 实现稳定行走. 图 5 为在线步态调整方法示意图.

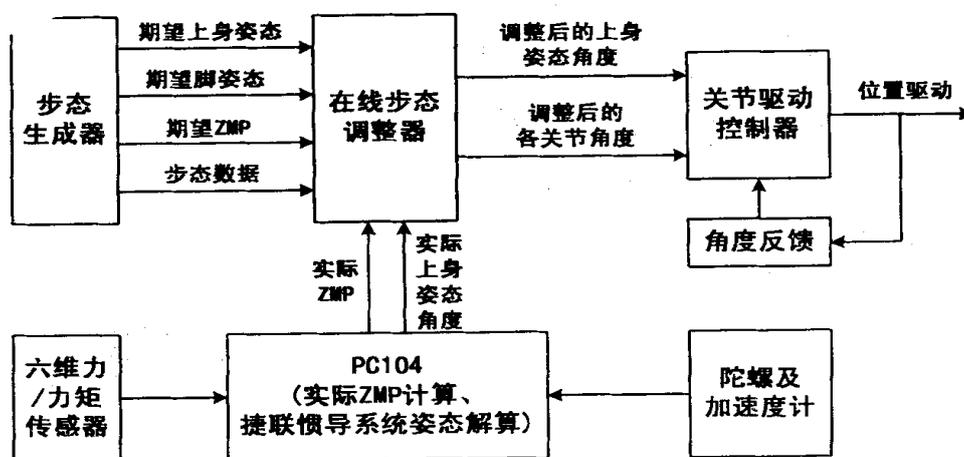


图 5 在线步态调整总体示意图

Fig. 5 Sketch map of on-line planning

4 研究展望(Research prospects)

根据目前研究进展情况, 下一步研究将按照短期和长期计划进行. 短期研究的重点是完善 THBIP-I 机器人结构样机, 安装头部和手臂, 调试传感及控制系统, 应用仿真数据, 使机器人能够在平地上稳定行走. 长期计划将研究拟人机器人运动学、动力学、运动稳定性、动态控制等理论问题. 实现拟人机器人在线步态生成.

本文所述的研究工作不仅仅是本文作者工作的成果, 它是课题组全体研究者共同研究的结果, 在此对所有研究者表示感谢. 同时感谢清华大学“985”项目的资助.

参考文献 (References)

- 1 包志军, 马培荪, 姜山, 程君实, 王春雨. 从两足机器人到仿人型机器人的研究历史及其问题. 机器人, 1999, 21(4): 312- 320
- 2 M. 伍科布拉托维奇 著, 马培荪, 沈乃熏 译. 步行机器人和动力

型假肢. 科学出版社, 1983

- 3 Fred R. Sias Jr, Yuan F Zheng. How Many Degrees-of-freedom Does a Biped Need. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and System IROS'90
- 4 Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa & Toru Takenaka. The Development of Honda Humanoid Robot. 0-7803-4300-x-5/98\$ 10.00 1998 IEEE
- 5 Qinghua Li, Atsuo Takamishi, Ichiro Kato. A Biped Walking Robot Having A ZMP Measurement System Using Universal Force-Moment Sensors. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91, 1991. 3- 5

作者简介:

刘 莉 (1965-), 女, 博士后. 研究领域: 机器人技术, 机器人传感器技术.

汪劲松 (1964-), 男, 教授, 博导. 研究领域: 足式移动机器人, 先进制造装备控制与系统, 绿色设计.

陈 昱 (1954-), 男, 教授, 博导. 研究领域: 机器人学, 机电系统控制, 制造自动化.

(上接第 233 页)

封装, 显示了基于 C/S 模型机器人分布式控制网络的优点. 最后, 文中以实例说明了基于 C/S 模型机器人控制器的基于 Win NT 操作系统下的机器人 Win32 柔性自动化应用程序和机器人基于 Web 的监控程序的框架和实现过程, 为实现机器人柔性自动化系统和机器人实时远程监控系统的开发提供了基础. 同时为机器人控制器在网络化, 向分布式和开放式的标准控制系统方向发展作了一点基础研究.

参考文献 (References)

- 1 张福学编著. 机器人学智能机器人传感器技术. 电子工业出版社, 北京, 1996. 9
- 2 郑文波. 网络技术与控制系统的技术创新. 测控技术, 19(6)
- 3 刘锦德等编著. 计算机网络大全. 电子工业出版社, 北京, 1997. 1
- 4 鲁士文编著. 计算机网络协议和实现技术. 清华大学出版社, 北京, 2000. 7
- 5 Viktor Torsh. Windows 98/NT 编程大全. 电子工业出版社, 北京, 1999. 6
- 6 Dale Rogerson. COM 技术内幕. 清华大学出版社, 北京, 1999. 3
- 7 ABB Robotics AB DPT/MT. Product On-line Manual IRB 2400,

Sweden, 1998

- 8 ABB Robotics AB DPT/MT. RAPID Programming Development Manual, Sweden, 1998
- 9 ABB Robotics AB DPT/MT. IRB 2400 User's Guide, Sweden, 1998
- 10 ABB Robotics AB DPT/MT. RAP Service Specification. Sweden, 1998
- 11 Marcelo H. Ang Jr, WeiLin, SerYong Lim. A Walk-thought programmed Robot for Welding in Shipyards. the Industrial Robot: An International Journal, 1999, 26(5): 377- 388

作者简介:

王宏杰 (1974-), 男, 上海交通大学电子信息学院仪器工程系博士生. 研究领域: 机器人视觉, 视觉伺服控制方法及机器人柔性自动化系统.

颜国正 (1961-), 男, 上海交通大学电子信息学院仪器工程系教授, 博士生导师. 研究领域: 智能仪器工程, 智能机器人, 微型机电系统.

林良明 (1939-), 男, 上海交通大学电子信息学院仪器工程系教授, 博士生导师. 研究领域: 仿生机械, 仿生机器人系统, 仿生机械学, 机器人控制.