

仿人步行机器人机构设计*

周华平, 冯金光

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 仿人步行机器人的机构是所有部件的载体,也是设计仿人机器人最基本的和首要的工作。本文根据项目规划和控制任务要求,按照从总体到部分、由主到次的原则,设计了一种适合仿人步行机器人控制的机构。文章首先从机构的设计目标出发,制定了总体设计方案,再根据总体方案进行了关键器件的选型,最后完成了各部分机构的详细设计工作。最终的机构在外型上具有仿人的效果,在功能上完全满足电气各部件机载化的安装要求。

关键词: 仿人机器人; 机构; 设计; 轴系

中图分类号: TP391.9

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2005)02-0009-04

Design of Framework for Humanoid Robot

ZHOU Hua-ping, FENG Jin-guang

(Mechatronics and Automation School, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: Framework carries all of the other parts in humanoid robot, so the design of framework is the first and basic work in humanoid robot design. According to the project layout and task requirement, the paper designs a new framework that is suited for humanoid robot. First draws the whole plan to target, then key components is selected, details of design are made out at last. The new framework looks like a human, it can bear the weight of whole robot, and all of electric components can be installed in the framework. It can fulfill the need of control for humanoid robot.

Key words: humanoid robot; framework; design; axis

0 引言

仿人步行机器人机构设计是机器人研制开发的首要问题。在本项目立项后,我们采取由总体到部分、由主到次的设计原则,根据项目整体机构高度、重量、总自由度数、自由度的布局、以及整体机构最终要达到的步幅和步速的要求,首先确定了仿人机器人机构的整体设计方案,其次根据研制进度的需要,按重要程度由高至低分步地进行了机构的设计、加工、装配和调试,直到满足设计要求。

1 机构总体设计方案

针对项目在机构方面拟订的目标,结合我们以前已有的工作基础,从仿人外形和仿人运动功能实现和完全机载化的要求出发,我们提出了机构的总体设计

方案如图 1 所示,具体如下。

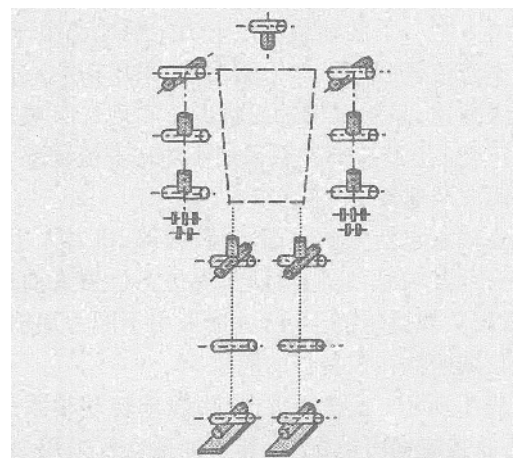


图 1 仿人机器人机构自由度示意图

机构高约 150cm,重量不超过 75kg,整体机构设

* 国家 836 计划资助项目(编号 2001AA422022)

计具有 36 个自由度。其中：下肢 12 个自由度，每条腿包括髋部前、侧向、转动各 1 自由度，膝部前向 1 个自由度，踝部前向、侧向各 1 个自由度，其中髋部 3 个自由度完全正交，踝部 2 个自由度完全正交；双臂共 12 个自由度，每条手臂包括肩部前向和侧向各 1 个自由度、肘部转动和前向各 1 个自由度、腕部转动和前向各 1 个自由度，其中肩部 2 个自由度正交，肘部 2 个自由度正交，腕部 2 个自由度正交；头颈部侧向转动和俯仰各 1 个自由度；双手共 10 个自由度，每只手各有 5 根手指，每根手指由一个自由度通过钢丝控制其自贴合运动。在设计中，为了满足机载电气部分完全机载化的安装要求，利用机器人头部和四肢分散空间实现分布式电气模块就近机载，利用机器人胸腹部并设计一个后背箱作为电源子系统和控制子系统的机载化安装空间。

2 关键器件选型

仿人机器人机构设计中关节轴系的设计必须结构紧凑，传动精度和效率高，并保证提供必要的输出力矩和输出速度，以满足机构动态步行运动速度和承载能力的要求。在上述机构的总体设计方案制定后，我们对机构中关键器件进行了选型，主要包括轴系电机、减速装置、传感器等，为此我们根据轴系对运动实现的重要性把机器人所有轴系分为两类：主要轴系和次要轴系。

主要轴系包括下肢所有轴系和上肢肩部轴系，它们涉及仿人机器人基本运动功能的实现问题，因此是本项目机构设计的核心问题，其基本元件和结构方式必须首先确定下来才能展开以此为机构的机构和机加工工作。在这些轴系中，我们沿袭了电机、减速机构、输出轴和传感器一体化的紧凑设计原则，根据轴系输出力矩和输出速度的要求，确定了主要轴系器件的选型方案：下肢轴系满足大力矩的输出要求，采用大功率直流伺服电机作为驱动器，采用谐波减速器实现一级减速，采用直齿轮或斜齿轮实现二级减速和关节的正交。上肢肩部轴系采用小功率直流伺服电机和一级谐波减速器、传感器组成。

次要轴系包括上肢肘部、上肢腕部、机器人手部、机器人头部各轴系，它们辅助实现仿人机器人的运动功能，根据负载要求的不同，直接采用不同力矩输出、内置齿轮减速器和控制器的舵机。

如表 1 所示，下肢轴系中，除髋部转动轴系采用了 75W 的直流伺服电机外，其它轴系全部采用 200W 的直流驱动电机。下肢所有轴系全部采用两级减速方式，一级减速采用回差极小的谐波减速器，除髋部转

表 1 主要轴系电机减速机构参数

轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	MINIMOTOR	24V 轴74W轴	轴系名称	轴系名称	100
轴系名称	3557C	6700rpm轴105mNm	100轴1	1轴1	
轴系名称	MINIMOTOR	24V, 224W, 6700rpm	轴系名称	轴系名称	492
轴系名称	3863C	m轴1270mNm	164轴1	3轴1	
轴系名称	MINIMOTOR	24V, 224W, 6700rpm	轴系名称	轴系名称	492
轴系名称	3863C	m轴1270mNm	164轴1	3轴1	
轴系名称	MINIMOTOR	24V, 224W, 6700rpm	轴系名称	轴系名称	492
轴系名称	3863C	m轴1270mNm	164轴1	3轴1	
轴系名称	MINIMOTOR	24V, 224W, 6700rpm	轴系名称	轴系名称	492
轴系名称	3863C	m轴1270mNm	164轴1	3轴1	
轴系名称	MINIMOTOR	24V 轴74W轴	轴系名称	轴系名称	100
轴系名称	3557C	6700rpm轴105mNm	100轴1	轴	
轴系名称	CLIFTON	24V 轴24W轴	轴系名称	轴	100
轴系名称	PRECISION	5500rpm轴55mNm	100轴1		
轴系名称	AS-7800-009				

动轴系速比为 100 外，其它轴系速比为 164；二级减速除髋部转动轴系采用斜齿等比传动外，其它轴系全部采用速比为 3 的直齿减速传动。上肢肩部轴系中，前向关节为肩根部关节，需要一定的力矩输出，因此采用 75W 的直流伺服电机和速比为 100 的谐波减速器，为了减轻上肢的重量，侧向关节根据其负载要求采用了 20W 的直流伺服电机和速比为 100 的谐波减速器。

以 MINIMOTOR 3863C 200W 电机为例，按其正常连续工作输出力矩 110mNm 计算，经过两级 492 倍减速，其输出力矩可达 552.3kgcm，考虑传动效率 80%，输出力矩达 441.8kgcm。

根据上述输出力矩估计，下肢 200W 电机轴系可以驱动力臂 10cm 重量约 44kg 的负载，完全可满足总体输出力矩的要求。

如表 2 所示的次要轴系中，上肢肘部转动和前向

表 2 次要轴系电机减速机构参数

轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	S5301	5-7V轴21.0 kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	S5301	5-7V轴21.0 kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	S5301	5-7V轴21.0 kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	S5301	5-7V轴21.0 kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	HS-615MG	5-7V轴7.7kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	HS-615MG	5-7V轴7.7kg-cm, 0.23 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称
轴系名称	S3102	5-7V轴1.2kg-cm, 0.11 轴/60 轴	轴系名称	轴系名称	轴系名称

轴系、上肢腕部转动轴系、头颈部俯仰轴系需要较大的力矩输出，但又不能导致肩部轴系负载过大，因此采用了输出力矩较大的一体化航模舵机 S5301；上肢腕部前向轴系、头颈部转动轴系需要的力矩较小，采用输出力矩和重量适中的控制器、齿轮减速器一体化

航模舵机 HS-615MG; 手部所有 10 个轴系为了满足驱动和控制内置于掌中的要求, 采用了体积小、重量轻的一体化舵机 S3102。

如表 3 所示, 在本仿人机器人系统中, 主要轴系

表 3 轴系传感器机构参数

轴系名称	轴	轴	轴系名称	轴系名称
轴系名称、踝部侧向	WDD30-4	5kU轴系名称、30mm	轴系名称、踝部侧向	
轴系名称、踝部侧向、膝	WDD35D-4	5kU轴系名称、35mm	轴系名称、踝部侧向	
轴系名称、踝部侧向	WDD35D-4	5kU轴系名称、35mm	轴系名称、踝部侧向	
轴系名称		轴系	轴系名称、踝部	

全部采用电位器作为位速传感器, 传感器输出信号直接反映出轴系的伺服位置, 输出信号经过差分处理后得到速度伺服信号。主要轴系中下肢轴系传感器直接同轴连接在低速输出轴上, 上肢肩部轴系传感器通过同步带和输出轴连接。次要轴系传感器同样是电位器, 它内置于一体化舵机中, 和电机输出轴同轴连接。

3 机构具体设计

在上述机构总体设计方案和关键轴系器件确定后, 我们对整体机构进行了由主到次的具体设计, 其中包括下肢承载平台即下体机构设计、躯干机构设计、上肢机构设计、头颈机构设计、手部机构设计和机载安装空间的设计, 下面对这些工作进行具体的说明。

3.1 下体机构设计

下肢关节轴系结构设计, 一般考虑的主要因素包括三个方面, 其一是轴系最大驱动力矩要求, 其二是轴系的结构强度和运动速度要求, 其三是轴系的重量限制。在本项目中, 下肢轴系一方面需要提供足够的力矩和结构强度才能实现对本身和上体的承载, 另一方面要达到足够的运动速度才能使机器人整体步行速度达到项目指标的要求。因此, 对下肢关节轴系, 上述三个因素需要并重考虑, 即在保证所需强度、驱动力矩、运动速度下, 在重量、结构和尺寸上进行优化。在整个下肢的结构设计中, 我们摒弃了以往的关节串行链接的模式, 通过直齿平移或斜齿传动, 在实现二次减速的同时, 使得多轴关节完全正交, 其中包括踝部的前向与侧向关节完全正交, 髌部的前向、侧向、转动三个关节完全正交。

3.2 躯干机构设计

躯干在仿人机器人中不仅仅起到连接下肢、上肢和头颈部分的作用, 而且要为机载安装设备提供安装空间。在本项目中上肢部分的大功率轴系、上肢底层功率驱动器、语音识别控制器、无线遥控监控器以及锂离子电池组等都需要安装在机器人躯干部分, 因此我们以板筋为材料, 将躯干设计为一个中空的腔体,

内部设计有支撑板, 一方面保证腔体的结构强度, 另一方面提供上述机载设备的安装构架, 同时为了机载设备的维护更换方便, 我们将躯干外围板筋设计成为各方可以自由装卸的组合形式。

3.3 上肢机构设计

上肢机构设计主要考虑满足各运动自由度的要求和机载系统的安装要求。在上肢的设计中, 为尽可能减少负载, 肩关节 2 个自由度分别采用 70W 和 20W 电机驱动的机电驱动模块直接驱动关节运动, 其余 4 个关节均采用大功率一体化数控电机直接控制关节运动(大臂滚动、肘关节、小臂滚动、腕关节)。上肢这种设计在保证机构运动功能要求的前提下, 大大减轻了机构重量, 减少了控制系统的复杂性。

3.4 头颈机构设计

在本项目中, 我们拟订头颈两个自由度: 转动和俯仰。为了减轻头部的重量, 我们对这两个轴系直接采用功率适当的一体化舵机辅以板筋机构件来实现, 头部外壳采用板筋组合设计为卡通机器人形象, 内部安装有摄像头。

3.5 手部机构设计

仿人手爪是仿人机器人在外形和功能上仿人的必要组成部分和重要环节, 对手爪的研究在整个机器人技术中也有着极其重要的地位。在本项目中, 我们模仿人手的基本结构、特点和功能, 设计和研制了以实现演示功能为目的的简易仿人机器人手爪。我们首先从手爪的机构抓持、操作等特点出发, 分析了几种常见的手爪机构, 并着重对特殊手爪机构的结构形式和特点进行了分析, 在此基础上, 从仿生学角度, 模仿人类手指的功能、特点, 对仿人机器人简易手指的结构进行了优化分析和设计, 提出了一种“欠驱动”结构的设计方法。与常规的手爪结构相比, 这种“欠驱动”的手指结构操作更加灵活, 能实现多功能的抓取操作, 不但有利于减少控制的复杂性, 减轻重量, 降低能耗, 而且具有更好的适应性、稳定性和柔韧性。

整个简易仿人手爪的设计是根据人类手的结构、功能, 采用了四个手指和一个大拇指相配合的结构, 关节之间以钢丝拉动作为肌腱, 每一个手指分别由一个独立的电机控制, 来完成抓、握、捏以及其它各种较为复杂的动作。

3.6 机载安装空间设计

电气机载化安装是本项目的主要目标之一, 因此在机构的设计中, 机载电源子系统和控制子系统的机载安装空间和机载载荷平衡问题必须周到考虑。一方面我们尽量提高机载部分集成度, 减轻机载部分重

量,另一方面采用模块化分散化的设计原则和安装方式,尽量利用零散的机载空间。

在机器人躯干部分设计中,其内腔均设计为机载安装空间,但是由于完全机载化的要求,该空间远远满足不了系统的要求。为此我们设计了一个后背箱,作为控制计算机主机、多轴运动控制器组、电源变换模块、无线通讯模块、电源监测与控制模块以及接线端子连接器的机载空间。

下肢轴系设计模块化后,采用板筋结构连接各个轴系组成整个下肢,轴系间板筋围成的空间作为下肢轴系底层功率驱动器的机载空间。

4 机构设计结果

机器人外形示意如图 2,整体身高 155cm,整机重量(包括机载设备)约 63.5kg,机构共具有 36 个自由度:其中下肢 12 个自由度,每条腿包括 3 个前向自由度、2 个侧向自由度和 1 个转弯自由度;上肢共 12 个

自由度,其中每条手臂包括肩关节前向、侧向及大臂滚动 3 个自由度、肘关节前向、小臂滚动和手腕各 1 个自由度;头颈部侧向转动和俯仰各 1 个自由度;双手共 10 个自由度,每只手各有 5 根手指;在机器人头部和四肢设计有分布安装空间,可分布机载机器人的电气功能模块;在机器人胸腹以及后背箱,设计有电源和控制系统的机载化安装空间,可充分满足仿人机器人完全机载化的要求。

在机构的设计中,重量一直是我们控制的一个重要指标,我们最终完成的仿人机器人机构总重约大约 63.5kg,达到预期的控制目标。其中上臂约 5.5kg,下肢约 33kg,躯干及后背箱约 8.0kg,机载电源约 12kg,头部约 0.6kg,机载控制部分约 4.4kg。在整个重量结构中,机载电源部分所占比重较大,这是目前国内锂离子电池本身局限和我们拟订的机器人无缆工作时间指标较高所致。

5 结论

我们在确定仿人机器人机构总体自由度数量、自由度布局、主要轴系设计方案和机载安装空间的要求后,对整体结构进行了全面的设计、加工、装配及调试,完成了一套较为完整的仿人机器人机构,完全实现了预期的目标要求。多次实验证明,该机构不仅在外形上进一步实现了仿人的效果,而且结构灵活,承载力强,完全可以满足机器人的运动要求。

参 考 文 献

- [1] Kazuo Hirai.The Honda Humanoid Robot Development and Futrue Perspective.Induatrial Robot :An International Journal,1999 26(4)
- [2] Yong K.Hwang etc. Int.J.of Robotics Research,1998,17,1131-1149
- [3] Dean F.Hougen etc.A Miniature Robotic System for Reconnaissance and Surveillance.IEEE International Conference on Robotics & Automation Conference 2000.
- [4] 刘建群,黄浩权.组合机床与自动化加工技术[J].电子技术 2001(2)
- [5] Cen Young and Draig G.Pickin.A ccuracy assessment of the modern industrial robot.Industrial Robot 2000 27(6)
- [6] Rodney A. Brooks,etc. The Cog Project:Building a Humanoid Robot. To appear in a Spinger-Verlag Lecture Notes in Computer Science Volume, 1999.
- [7] 张福学.机器人技术及其应用[M].电子工业出版社,2000.
- [8] Tarun Kanti Podder ,Nilanjan Sarkar.Fault-tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thruster redundancy.Robotics and Autonomous Systems 2001 34.

作者简介:

周华平(1969-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究领域:自动控制理论及应用,机器人控制,智能系统。

收稿日期 2004-09-13

(马甲军 编发)

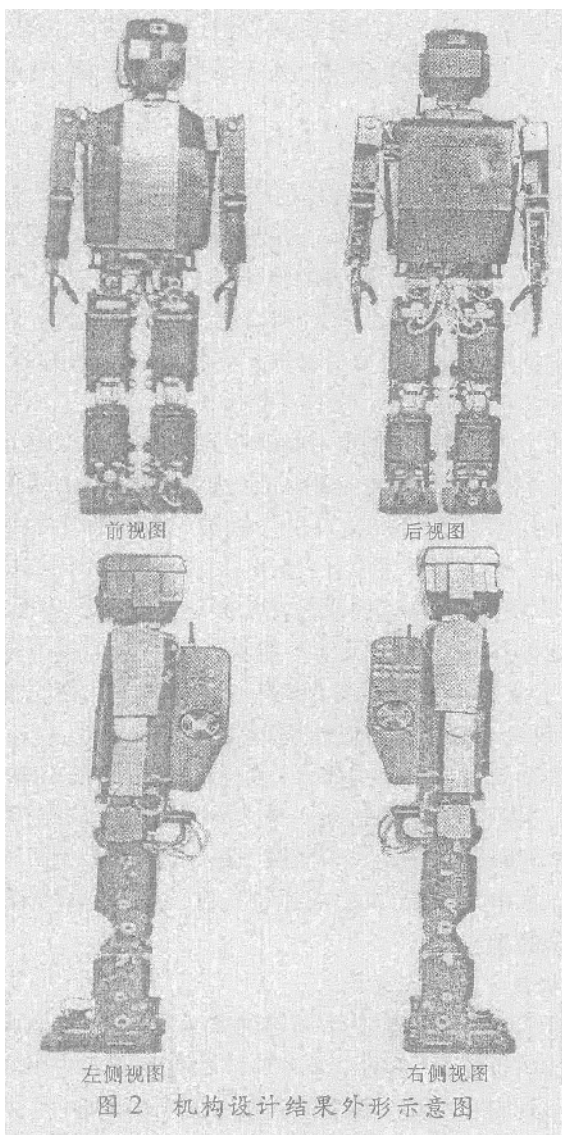


图 2 机构设计结果外形示意图