

文章编号: 1002-0446(2003)02-0101-04

仿人机器人柔性腰部机构研究

赵铁军^{1,2,3} 赵明扬¹ 单光坤² 王洪光¹ 陈书宏¹

(1. 中国科学院沈阳自动化所 沈阳 110016; 2. 沈阳工业大学机械工程学院 110023; 3. 中国科学院研究生院)

摘要: 仿人机器人腰部的构成对仿人机器人的运动学、动力学性能起着重要的作用. 本文着重分析了目前仿人机器人腰部机构存在的问题, 提出了一种具有柔性特征的仿人机器人腰部设计方案, 并分析了此腰部机构对机器人的运动稳定性、操作柔顺性的影响. 本设计使仿人机器人具有良好的柔顺性, 提高了机器人与人协作时的安全性、稳定性和抗干扰能力.

关键词: 仿人机器人; 柔性; 腰

中图分类号: TP24

文献标识码: B

STUDY OF FLEXIBLE WAIST MECHANISM FOR MOBILE HUMANOID ROBOT

ZHAO Tie-jun^{1,2,3} ZHAO Ming-yang¹ SHAN Guang-kun²

WANG Hong-guang¹ CHEN Shu-hong¹

(1. Shenyang Institute of Automation, the Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Shenyang University of Technology, Shenyang 110023; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The waist of humanoid robot plays an important role on the kinematics and dynamics characteristics of the whole body. This paper described problems of the humanoid robot waist and presented a flexible waist that could vary the joint stiffness. The influence of this waist on the compliant characteristics and the stability of the whole body were studied. This waist can stabilize the humanoid robot by performing the waist and the arms dynamic cooperative motion and realize security by varying the joint stiffness while operating.

Keywords: humanoid robot, flexible, waist

1 引言(Introduction)

仿人机器人是当前机器人科学工作者的主要研究课题之一. 仿人机器人是依据人体构成的基本原理及运动机理开展研究的, 它的研究目标是实现人类所具有的直立行走及双手操作功能, 同时, 具有人类运动的灵活性、自主性和适应性. 人体的腰部是一个典型的超冗余度系统, 它具有高度的灵活性、柔韧性, 是人体系统运动的调节中枢. 为使仿人机器人具有良好的运动灵活性, 仿人机器人腰部的构成及其运动学、动力学性能起着极为重要的作用. 与人类腰部一样, 仿人机器人腰部应具有调节身体重心以保持系统平衡、协调上身与下肢间的运动和隔离上身

与下肢间的运动干扰等作用.

目前对仿人机器人的腰部机构尚未有人进行专项研究. 仿人机器人腰部的存在只是作为扩展机器人工作空间的手段, 不具有人体腰部的调节功能. 日本本田公司的 ASIMO、东京大学的 H6、早稻田大学的 WABIN 步行仿人机器人都采用双腿的胯部关节实现人体腰部的俯仰和侧倾运动; 美国麻省理工学院研制的 COG 仿人机器人的腰部由串联机构组成, 具有三个自由度, 可以实现俯仰、侧倾、回转等运动; 德国波鸿鲁尔大学研制的 ARNOLD 仿人机器人的腰部具有一个自由度, 可以实现俯仰运动; 上述仿人机器人的腰部使机器人可以完成身体前倾拾取物体

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2001AA422170).

收稿日期: 2002-08-28

等动作。

现有的仿人机器人多采用串联驱动方式的腰部机构,它存在几个缺点:1)由于串联驱动使其中一个方向的驱动电机和传动链成为其它方向驱动电机的负载,增加了电机的负荷,同时也影响了关节的动态性能;2)串联驱动要求驱动不同方向运动的电机和传动链处于上下不同平面,增加了腰部的高度,使仿人机器人重心提高,降低了仿人机器人的运动稳定性;3)串联驱动的误差是关节误差的累积,导致腰部误差的放大。此外,仿人机器人腰部机构也可以采用并联机构驱动方式。并联机构可以把驱动电机布置在同一个平面上,克服了串联机构的上述缺点,但并联机构的运动范围小,限制了仿人机器人的运动范围。

本文针对仿人机器人腰部在仿人机器人运动中的特殊作用,提出了一种新的腰部机构形式,使仿人机器人腰部的运动学和动力学性能得到改善。

2 腰部机构设计原理(Principle of the waist)

2.1 腰部机构设计的基本原则

根据仿人机器人腰部在仿人机器人运动中的特殊作用,腰部机构设计应遵循下列原则:1)具有与人体腰部相近的灵活工作空间和基本自由度;2)在实现良好的灵活度的同时提高关节的承载能力和精度;3)驱动电机应尽量避免关节和运动件,这样有利于改善腰部的动态特性;4)具有人体腰部的柔顺性,实现仿人机器人上身与下肢间的运动调节;5)通过合理的补偿运动调节机器人的 ZMP 位置,保证机器人的操作稳定性。

2.2 腰部机构性能指标

本仿人机器人腰部机构是轮式移动宜人机器人的一个组成部分。轮式移动宜人机器人(见图 1)是一个仿人机器人技术开发研究平台,它由正交轮式移动平台、腰部、双臂及夹持器、躯干及头部组成,共 23 个自由度,整体结构包括:电源系统、机械系统、控制系统和传感系统。其中,采用国家“863”课题完成的、技术相对成熟的正交轮式移动机器人作为移动支撑平台,实现运动灵活性。正交轮式移动机器人是一种具有完整约束的全方位移动机器人,具有横向、纵向移动和回转三个自由度。为保证轮式移动宜人机器人进行离线工作,机器人的电源系统及控制计算机都安装在移动平台内部。轮式移动宜人机器人的手臂由 3DOF 肩部关节、1DOF 肘部关节和 3DOF 腕部关节组成,躯干下端连接腰部,上端支撑头部及双

臂,躯干在靠近头部的一端具有回转、俯仰两个自由度,起颈部的作用,头部内安装有机器人的视觉系统。本仿人机器人上身重量为:头部 5kg,躯干 10kg,双臂 46kg。腰部的运动要求为:前倾 60° ,后仰 5° ,左右侧倾 30° ,运动速度 0.2 弧度/秒,加速度 0.1 弧度/秒。根据上述运动参数计算出腰部最大前倾力矩约 450Nm,最大侧倾力矩约 200Nm。

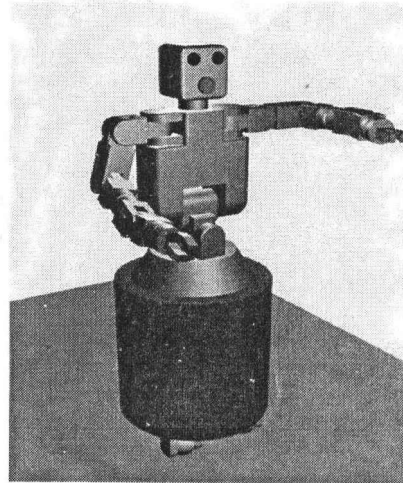


图 1 轮式移动宜人机器人

Fig. 1 The humanoid robot

2.3 腰部机构传动过程及结构设计

本仿人机器人腰部机构由驱动电机、差动轮系、支撑板、连杆、柔索和变刚度结构单元组成,其中,两个差动轮系采用了封闭式传动(见图 2)。一个差动轮系存在两个自由度,两个差动轮系封闭传动后,系统仍存在两个自由度,其中, I_1, I_2 是驱动电机, A_1, A_2 是输出轴。工作时, I_1, I_2 电机驱动加法器 p_1 的输出轴 A_1 转动;同时, I_1, I_2 电机驱动加法器 p_2 的输出轴转动,并通过一对圆锥齿轮驱动输出轴 A_2 转动。差动轮系封闭传动系统安装在下板上(见图 3)。输出轴 A_1 驱动连杆 1, 连杆 1, 1^1 支撑在中间板的中心轴线上,上端与中间板固接,连杆 1 的下端与输出轴 A_1 连接,连杆 1^1 通过铰链与下板相连。连杆 2, 2^1 一端与中间板固接,另一端与上板铰接, $2, 2^1$ 两端分别连接在中间板与上板的中心轴线上,则上板随中间板作同步的侧倾运动,从而实现腰部的侧倾运动。柔索 3, 3^1 一端固接于上板的中心轴线上,另一端固接于输出轴 A_2 上,两者采用反向连接,即柔索 3, 3^1 运动方向相反,这样,由柔索 3, 3^1 驱动上板,实现俯仰运动。上板上安装仿人机器人躯干等部件。

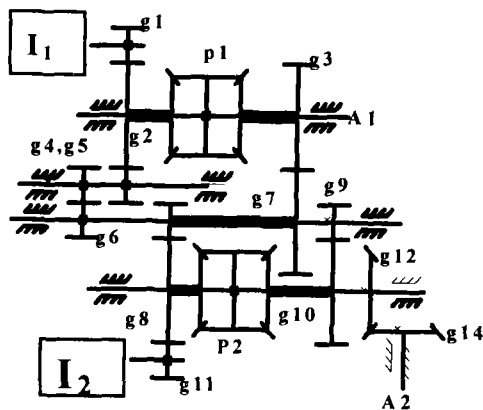


图2 差动轮系封闭传动
Fig. 2 The differential mechanisms

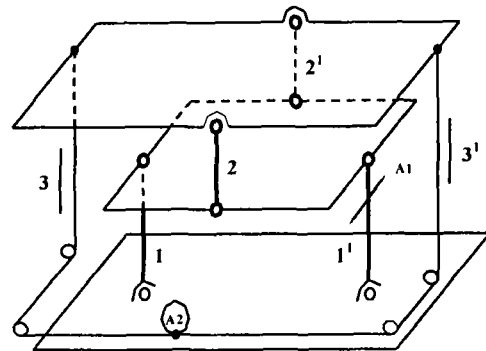


图3 机器人腰部传动示意图
Fig. 3 The sketch map of the waist

2.4 腰部机构传动运动分析

由于采用中间轮 g_4 、 g_5 起到了改变旋转方向的作用,则差动轮系的输出轴 A_1 、 A_2 的速度分别为

$$\omega_{A1} = |\omega_{I1} + \omega_{I2}| \quad (1)$$

$$\omega_{A2} = |\omega_{I1} - \omega_{I2}| \quad (2)$$

此差动轮系的输出轴 A_1 、 A_2 分别作为仿人机器人腰部的侧倾、俯仰运动的驱动轴,因此,此仿人机器人腰部机构即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。

2.5 腰部机构特点

根据仿人机器人腰部的性能指标要求,当采用串联机构时,俯仰驱动电机功率为 500W,侧倾驱动电机功率为 300W,腰部高度为 400 毫米。采用本腰部机构后,选用两个 300W 直流电机既可满足要求,同时腰部高度降至 230 毫米。

与串联方式的腰部机构相比,此仿人机器人腰部机构在改善仿人机器人动态性能方面具有显著特点:1)此机构中两个方向的驱动电机和传动链都布置在下板上,降低了腰部的高度,从而,降低了仿人机器人的重心,提高了系统的稳定性。2)此机构的两个驱动电机不是串联布置,避开了关节和运动件,这样不仅降低了电机的负载,同时,改善了关节的动态特性,提高了腰部的运动精度。3)采用两个差动轮系封闭传动方式,其中的加法器具有双电机驱动单方向运动的特点,从而,大大降低了选用电机的功率,减少了仿人机器人的电源消耗。4)采用柔索驱动仿人机器人腰部的俯仰运动,使仿人机器人腰部具有

柔性。柔索驱动方式可以通过引入非线性变刚度结构单元实现仿人机器人腰部的刚度控制,从而,提高了系统的柔顺性和抗干扰能力,使仿人机器人在与人协作时更加安全。5)采用连杆支撑和驱动,满足了仿人机器人腰部运动范围大、承载能力高的要求。6)通过合理的补偿运动可以调节机器人的 ZMP 位置。

3 仿人机器人腰部的刚度控制(Control of the stiffness of waist)

仿人机器人腰部具有变刚度的特点对机器人在与人协作时保证人的安全具有非常重要的意义。现有的仿人机器人多采用变刚度控制策略实现机器人的刚度调节,这种方法对刚度调节的范围较小。本仿人机器人腰部采用柔索与非线性变刚度结构单元。

共同驱动机器人的俯仰运动,实现变刚度控制,其刚度调节范围理论上可以从零变化到无穷大。非线性变刚度结构单元由四个定滑轮、两个动滑轮、柔索、线性弹簧和回转臂组成,其中,回转臂通过改变转角来调整两个动滑轮之间的距离,与线性弹簧一起实现驱动柔索的刚度变化。由于此仿人机器人的俯仰运动范围大,驱动力矩变化大,而侧倾运动范围小,驱动力矩变化小,因此,在俯仰运动中采用非线性变刚度结构单元,在侧倾运动中采用变刚度控制策略进行机器人腰部的变刚度控制。本仿人机器人腰部具有柔顺性,提高了机器人的运动安全性,并对协调上身与下肢间的运动和隔离上身与下肢间的运动干扰发挥重要作用。

4 仿人机器人腰部运动对 ZMP 的调节作用 (Optimization problems for ZMP matching)

根据南斯拉夫学者 M. Vukobratovic 提出的 ZMP 平衡理论,仿人行走时的稳定性判定条件是:机器人重力和惯性力的合力延长线落在机器人的支撑平面内,即通过机器人运动姿态的调整,使实际的 ZMP 点达到恰当的位置,与期望的 ZMP 点重合,其中 ZMP 点是指某一时刻机器人重力和惯性力的合力在支撑面上没有水平分力的那一点。即

$$\sum_i (r_i \times m_i a_i + I_i \epsilon_i + \omega_i \times I_i \omega_i) - \sum_i r_i \times m_i g = (0, 0, *)^T \quad (3)$$

式中 m_i, I_i ——仿人机器人双臂第 i 个运动杆件的质量、转动惯量;

$a_i, \omega_i, \epsilon_i$ ——仿人机器人双臂第 i 个运动杆件的加速度、角加速度;

p_i ——仿人机器人双臂第 i 个运动杆件在基础坐标系中的向量;

p_{ZMP} ——仿人机器人 ZMP 点在基础坐标系中的向量。

当 T 时,由公式(3)可以计算出 ZMP 点的位置

$$r_i = p_i - p_{ZMP} \quad (4)$$

由于全方位移动平台只具有平移、回转自由度,因此可以采用车体坐标系作为运动稳定性判定的基础坐标系。从上述平衡理论公式可以看出,在仿人机器人上肢操作过程中,通过机器人腰部的补偿运动可以改变仿人机器人双臂第 i 个运动杆件在基础坐标系中的向量 p_i 值,使 ZMP 点始终位于机器人的支撑范围内,从而保证机器人在操作过程中身体处于平衡状态。

5 结论(Conclusion)

本仿人机器人腰部机构克服了串联机构的缺

点,使驱动电机功率降低 40%,腰部的高度降低近一半,而它的运动范围与串联机构相同,高于并联机构。通过采用合理的控制技术本仿人机器人腰部可以具有调节身体重心以保持系统平衡、协调上身与下肢间的运动和隔离上身与下肢间的运动干扰等作用。本仿人机器人腰部机构,为实现仿人机器人的小型化,改善运动和动力性能,延长驱动电源使用寿命,提供了重要保证。

参考文献 (References)

- [1] <http://www.Honda.co.jp/robot/>
- [2] <http://www.ai.mit.edu/projects/cog/>
- [3] <http://www.ai.mit.edu/projects/kismet/kismet.html>
- [4] T A SFOUR, K Berns, J Schelling, R Dillmann, Germany. Programming of Manipulation Tasks of the humanoid Robot ARMAR.
- [5] Feng Gao, Fabrice Guy, and William A. Gruver Criteria based Analysis and Design of Three Degree of Freedom Planar Robotic Manipulators. IEEE. ICRA, 1997
- [6] Jun Tang, Keigo Watanabe, Yamato Shiraishi. Design and Traveling Experiment of an Omni-directional Holonomic Mobile robot. IROS 96
- [7] Toshio MORITA, Koji SHIBUYA, Shigeki SUGANO. Design and Control of Mobile Manipulation System for Human Symbiotic Humanoid Hadaly-2
- [8] Masayuki INABA, Takashi IGARASHI, Satoshi KAGAMI. Hirochika INOUE. A 35 DOF Humanoid that can Coordinate Arms and Legs in Standing up, Reaching and Grasping an Object. IROS 96
- [9] Thomas Bergener, Carsten Bruckhoff, Percy Dahm. Arnold: An Anthropomorphic Robot for Human Environments. IR-INI 97-12
- [10] Jungtae Kim, Sokho Chang, Insup Kim. Singularity analysis and its avoidance for KIST Hybrid master arm. '99 ICAR

作者简介:

赵铁军 (1967-),男,博士生.研究领域:机器人技术,等离子特种加工技术。

赵明扬 (1958-),男,研究员,博士生导师.研究领域:机器人技术等。