

机器人关节的发展现状与趋势

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044) 王光建 梁锡昌 蒋建东

摘要 机器人关节是机器人的基础部件,其性能的好坏直接影响机器人的性能。本文根据机器人关节的功能特点,驱动方式,应用场合和主要结构等进行了分类;介绍了典型的机器人关节结构形式,对工业机器人和拟人机器人的关节结构进行了较为详细的介绍;随着数字伺服技术等电子技术的发展,机器人关节也在不断发展。机器人关节呈现出大力矩、高精度、反应灵敏、小型化,机电一体化,标准化和模块化等趋势,以适应机器人技术发展的需要。

关键词 机器人发展 关节 驱动器

引言

机器人操作机是由一系列连杆通过旋转或移动关节相互连接组成的多自由度机构。一个关节系统包括驱动器、传动器和控制器,属于机器人的基础部件,是整个机器人伺服系统中的一个重要环节,其结构、重量、尺寸对机器人性能有直接影响。

1 机器人关节的分类

关节是各杆件间的结合部分,是实现机器人各种运动的运动副,由于机器人的种类很多,其功能要求不同,关节的配置和传动系统的形式都不同。

1.1 工业机器人关节的分类

工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人,其关节的分类见图 1,可以根据输出运动形式,传动机构,驱动器,有无减速器和运动副的不同对机器人关节进行分类^{[1][2]}。

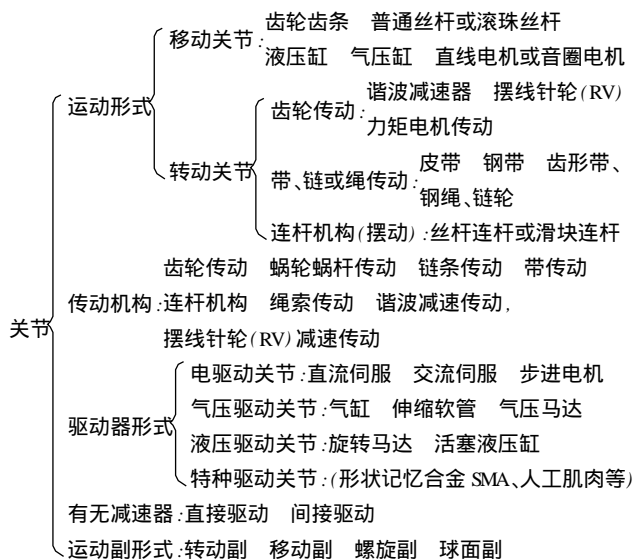


图 1 机器人关节分类

1.2 仿人机器人的关节的分类

仿人机器人可以进行双足移动,具有很好的适应性,是当代科技的研究热点之一。主要特点是冗余自由度高,机构复杂,由回转关节组成。仿人机器人关节可以分为上肢关节(肩、肘、腕、多指手),下肢关节(踝、膝、髌)。

1.3 微型机器人关节

微型机器人是利用集成电路微细加工工艺,如光刻技术将驱动器,关节传动装置及传感器控制器和电源等集成在很小的多晶硅上,微型静电马达、压电超声马达和微型传动机构等已经应用于关节系统。

2 工业机器人关节的发展现状

工业机器人常见的关节形式有移动关节和转动关节。应用最多的工业机器人是多关节机器人,它由多个回转关节和连杆组成,模拟人的肩关节、肘关节和腕关节等的作用。其关节与仿人机器人的肩、肘、腰关节等不同的是自由度个数。通常前者的肩、肘、腰关节的自由度为 1。

2.1 移动关节

移动关节采用直线驱动方式传递运动,包括直角坐标结构的驱动,圆柱坐标结构的径向驱动和垂直升降驱动,以及极坐标结构的径向伸缩驱动。直线运动可以直接由气缸或液压缸和活塞产生,也可以采用齿轮齿条、丝杆、螺母等传动元件把旋转运动转换成直线运动。产生移动关节直线运动的方式有以下几种

- 2.1.1 齿轮齿条装置 效率高,精度好,刚度好,缺点是回差大;
- 2.1.2 丝杆(滑动或滚珠) 效率、精度高,速比大;
- 2.1.3 液压缸 功率大,结构简单,响应快,无减速

装置,能直接与被驱动的杆件相连,但需要液压源,易产生泄漏;

2.1.4 气压缸 能源、结构较简单,但速度不易控制,精度不高。

2.1.5 直线电机或音圈电机驱动 精度高,但力矩较小。

2.2 回转关节

回转关节是连接相邻杆件,如手臂与机座,手臂与手腕,并实现相对回转或摆动的关节机构,由驱动器、回转轴和轴承组成。多数电机能直接产生旋转运动,但常需各种齿轮、链、皮带传动或其他减速装置,以获取较大的转矩。旋转运动传递和转换方式有以下几种

2.2.1 齿轮传动 特点是响应快,转矩大,刚性好,可实现转向改变和复合传动,轴间距不大。在图2所示的手臂机构中,两个电动机输出后,分别经过蜗轮蜗杆和齿轮减速后通过中间齿轮传递运动,中间齿轮上面具有相互垂直的轮齿,可以使臂关节分别绕 $x-x'$ 和 $y-y'$ 转动,是万向节的变形,因此又称为万向化关节^[3]。

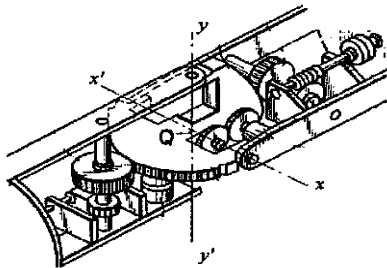


图2 万向化齿轮传动关节

2.2.2 带、链或绳传动 包括皮带,钢带,齿形带,链传动等。速比小,转矩小,刚度与张紧装置有关,轴间距大。常和其他传动结合使用。图3所示的绳传动由球面轴承、圆盘和3根绳连接^[4]。

2.2.3 谐波减速器 由波发生器、柔轮和刚轮组成,是一种靠波发生器使柔轮产生可控弹性变形,并靠柔轮与刚轮相啮合来传递运动和动力的。特点是结构紧凑,传动比大,精度、效率高,同轴线,结构简单,缺点是扭转刚性低。目前广泛

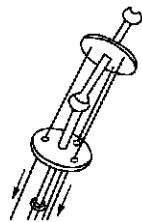


图3 绳传动关节

用于中小转矩的机器人关节。

2.2.4 摆线针轮(RV)传动 其内齿轮采用带滚针的圆弧齿,与其啮合的外齿轮采用摆线齿。如图4所

示,输入轴经齿轮传动传给行星齿轮,完成一级减速;与行星轮相连的曲柄轴是第二级减速的输入轴,RV外齿轮支承在曲柄偏心处的滚动轴承上,当行星轮转一周时,曲柄轴和RV齿轮被箱体内侧滚针挤压,受其反作用力作用,RV齿轮逐齿向输入运动的反方向运动。特点是速比大,同轴线、结构紧凑,效率高,其最显著的特点是刚性好、转动惯量小,固有频率高,振动小,适用于操作机上的第一级旋转关节(如腰关节),在频繁加速、减速的运动过程中可以提高响应速度并降低能量消耗。

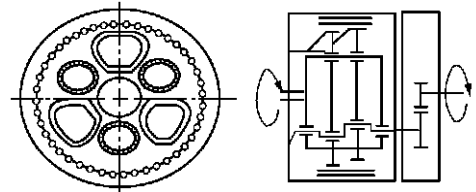


图4 摆线针轮(RV)传动

2.2.5 力矩电机传动(直接驱动) 无减速机构,刚度好,精度高,缺点是在关节处安装电机,关节重量增加。

2.2.6 连杆机构 包括平行四边形曲柄连杆机构,滑块连杆机构和丝杆连杆机构,回差小,刚性好,可保持特殊位形。丝杆连杆机构还具有变减速比的特点。图5所示为丝杆连杆机构,丝杆旋转后,螺母移动,又带动一个扇形齿轮,然后与另一扇形齿轮啮合产生旋转运动^[5]。

2.2.7 万向节式传动 图6所示关节类似于万向节,包含两个可独立旋转的转动轴和轴承,每个转动轴有一个驱动单元,通过操纵杆和轴承进行操作控制^[6]。

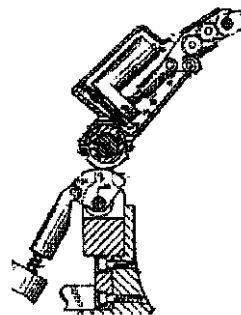


图5 曲柄连杆机构关节

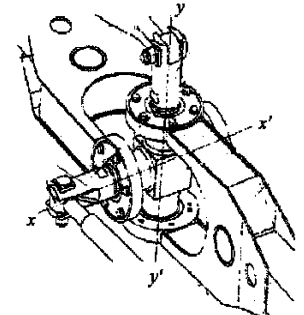


图6 万向节式传动关节

2.2.8 偏置式旋转关节 图7所示,旋转结构连接在一个斜面上,驱动轴轴线与被驱动轴轴线倾斜成一定角度,驱动器内置,多段连接就可以在空间形成复合运动^[7]。

2.2.9 SMA(形状记忆合金)式手臂 如图 8 所示,直线状合金,经脉冲电流加热后,通过滑轮把收缩变成弯曲、旋转动作,其中 1 为合金线,2 为滑轮,3 为肘部,4 为合金弹簧,5 为指部,6 为肩部^[8]。

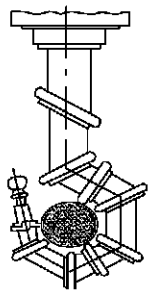


图 7 偏置式旋转关节

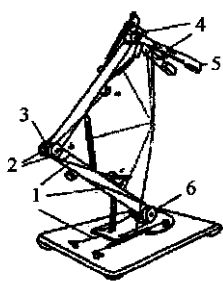


图 8 SMA 驱动手臂

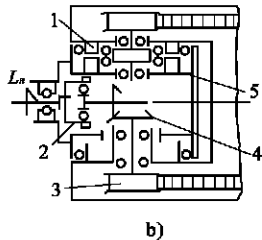
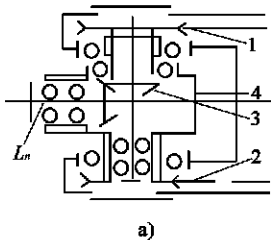


图 9 两自由度手腕

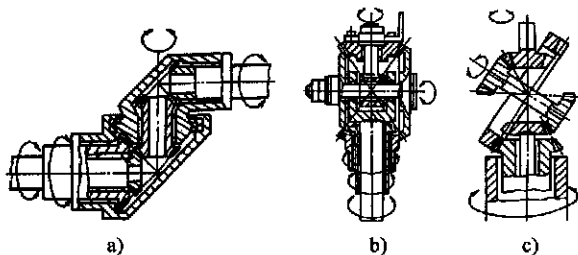


图 10 三自由度手腕

2.3 腕关节传动

手腕位于手臂末端,用来支承末端执行器并调整其姿态。按自由度分手腕可以分为单自由度、双自由度和三自由度 3 种。

对于两自由度手腕,常见的关节结构有,汇交式和偏置式。偏置式末杆回转范围大,结构紧凑。图 9a 所示为汇交式手腕,链轮 1 与锥齿轮 3 相联,通过齿轮副带动末杆 L_n 自转() ;链轮 2 与壳体 4 相联,转动后使末杆摆动(),从而形成两个自由度。图 9b 所示为谐波式汇交手腕,1、2 为谐波减速器,3 为齿形带,4 为锥齿轮。

三自由度手腕是在两自由度手腕的基础上加一个整个手腕相对于小臂的转动自由度而形成的,有偏置式和汇交式。常用结构如图 10 所示。

图 11 所示为三自由度手腕,包括外套 120,万向节 140,128,146,132,扇形齿轮 136、138、142、148,锥齿轮 168、170、174、178;转动驱动轴(roll) 162,俯仰驱动轴(pitch) 164,偏转驱动轴(yaw) 166 等组成^[9]。

球形电机驱动的手腕,通常手腕关节是用单自由度电机驱动实现的,使用三自由度的球形电机来驱动,可以将关节和电机合为一体,直接驱动。实现三个方向的转动^[10]。

2.4 腰关节

工业机器人腰关节一般只有一个自由度,它连接机座与肩关节。腰关节有丝杆传动,同轴减速传动和平行轴传动等。同轴减速传动是电机通过 RV 减速器或谐波减速器来驱动,结构紧凑,高度尺寸小。平行轴式关节传动有时电机通过齿轮减速后再带动机器人腰部转动。

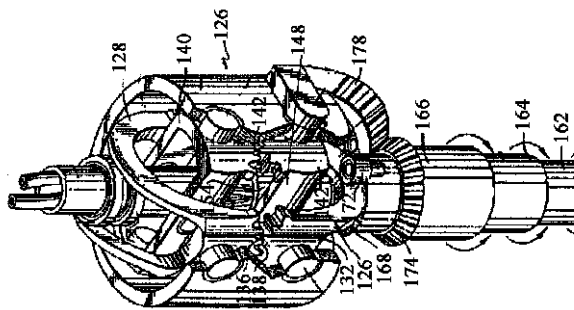


图 11 一个三自由度手腕

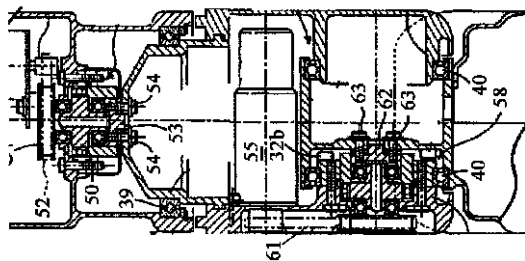


图 12 谐波传动手臂

3 仿人机器人关节的发展现状

仿人机器人分为仿人手臂型和仿人双足型。仿人手臂型主要研究 7 自由度(肩关节、肘关节、腕关节分别为 3、2 和 2 个自由度)手臂和多自由度操作臂、多指灵巧手及手臂和灵巧手的组合。仿人双足型主要研究步行机构及步行特性,下肢关节结构是步行质量好坏的关键。

3.1 主要肢干结构

3.1.1 采用谐波减速器(或加上同步带)的定传动比

装置来实现关节的运动,如本田公司 P3、Asimo 和索尼公司的 SDR - 3X 均采用谐波减速器。这是使用最广泛的形式。图 12 所示的手臂的肘关节由电动机 55 经同步齿形带 61 和谐波减速器 58 减速后,带动关节进行回转运动,图中 40 为滚珠轴承,63 为紧定螺钉,而 39 至 53 则为另一关节的对应部分^[11]。

3.1.2 采用滚珠丝杆和曲柄连杆机构,如 BIP2000 的踝关节和膝关节,清华大学的 THBIP 机器人。如图 13 所示的 BIP2000 的踝关节,其电机为平行布置^[12]。也有使用滚珠丝杆和绳传动一起使用^[13]。

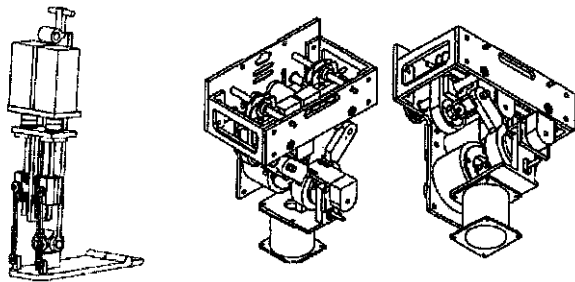


图 13 BIP2000 的下肢关节

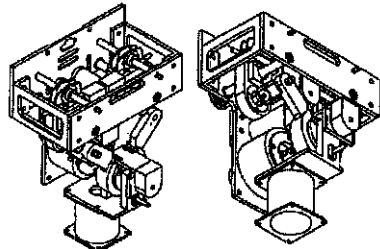


图 14 ROBIAN 髋关节

对于仿人机器人髋关节,一般有 3 个自由度(俯仰 pitch、偏转 yaw、翻滚 roll),其传动一般使用丝杆连杆和谐波减速器。BIP2000 在俯仰 pitch 方向使用丝杆连杆机构,而在偏转 yaw、翻滚 roll 方向则使用谐波减速器^[14]。而 R. Sellaouti 等人设计的 ROBIAN 髋关节,如图 14 所示,在偏转、翻滚方向使用直流电机驱动滚珠丝杆机构,在俯仰方向使用谐波减速器^[15]。

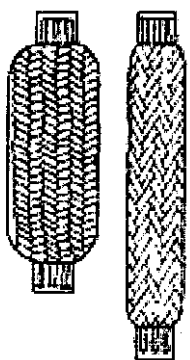


图 15 人工肌肉原理

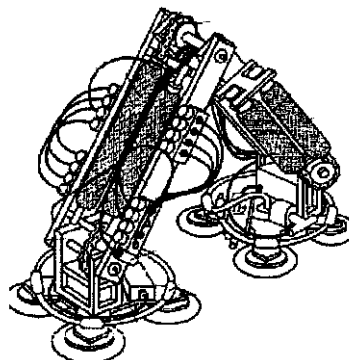


图 16 气动人工肌肉驱动的机器人

3.1.3 为了更好地模拟人的肌肉运动,仿人机器人中使用人工肌肉驱动关节。目前的人工肌肉有,高分子凝胶,它在电刺激下能反复伸缩将化学能直接转化为动能产生机械动作;形状记忆合金(SMA)受温度影响会像肌肉那样伸缩;气动橡胶人工肌肉(Rubber Actuator),是应用最多的一种,它是利用压缩空气伸缩橡胶的驱动部件。它的内部压力增加,则在直径方向膨胀,

轴方向收缩,并有轴向力输出,与链或带传动等结合便可输出转动,图 15 为原理图,这种肌肉的缺点是需要另外的气源。如图 16 为一个人工肌肉驱动的传动机构等,该机器人可在垂直和水平面间行走^[16]。

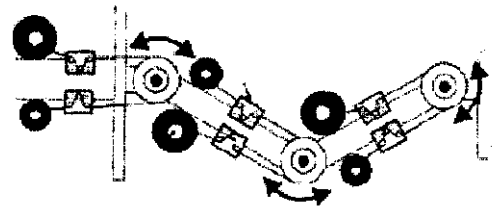


图 17 非线性弹簧驱动的机器人

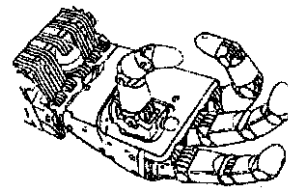


图 18 Utah/M. I. T 手爪

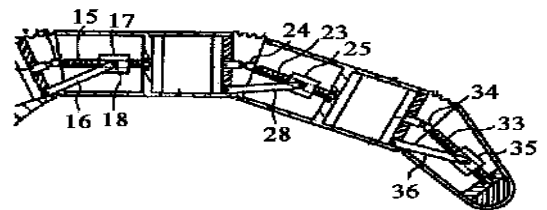


图 19 丝杆连杆机构手指

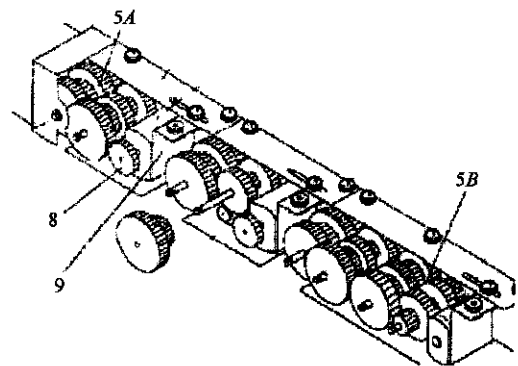


图 20 一种微型多指手

3.1.4 非线性弹簧驱动的机器人,日本 Jin 'ichi Yamaguchi 等也使用非线性弹簧来模拟肌肉的收缩特性。如图 17 所示为使用非线性弹簧驱动的机器人下肢关节结构^[17]。

3.2 多指手关节传动

用来模拟人手指关节的运动,一般具有 2 到 5 个手指。典型的有 Utah/M. I. T 手爪(见图 18),有 4 个手指,可实现对握,每个手指有 3 个屈伸关节和一个摆动关节,共 16 个自由度。各关节采用绳轮驱动,驱动器

后置^[18]。图 19 所示日本专利的手指有 3 个自由度,通过微型电机驱动丝杆连杆机构,从而实现手指弯曲,图中 15、23、33 为丝杆,17、25、35 为螺母,16、26、36 为连杆^[19]。图 20 所示为另一种多指手(NTU),具有 17 个自由度,每个手指关节独立驱动,使用微型电机和减速器,尺寸和人手相同,图中 5、8 等为减速齿轮,9 为驱动电机^[20]。希腊的 J. N. Sarris 等人用形状记忆合金研制多指手^[21]。

4 有关关节问题的几点看法

机器人的动作是由各种杆件和关节组合而产生的,因此关节对机器人的动作具有关键的作用。

关节按其功能组成单元讲,包括:1) 啮合副,指关节连接的前后杆以何基准作何运动;2) 连接副,指关节用何种方法与前后杆连接;3) 驱动器,关节总是以一杆为基准,而另一杆作相对运动的,驱动器指关节的动力源;4) 运动变换器,当驱动器与从动杆的运动形式方向不一致时,变换器需作相应的变换;5) 测量器,有时需测出从动杆的位移和力;6) 控制器,用于执行机器人的控制指令。

以上表明,虽然关节的种类很多,以转动关节为例,最基本的关节为绕基准杆自身轴线转动的关节和绕基准杆垂直轴线转动的关节,建议称前者为纵关节,后者为横关节。

在机器人组成部分中,机构包括关节机构是最重要的部分之一。随着伺服驱动、控制和传感技术等机电技术的不断发展,机器人关节呈现出新的特征和趋势。

4.1.1 关节机构的系列化、模块化、标准化 日、德、美的模块化直角坐标机器人可以根据构形、自由度、行程、负荷、速度和精度等组合出成千上万种型号,这样可以缩短设计周期,降低成本,促进机器人的发展^[22];

4.1.2 关节机构小型化 由于驱动电机占用关节空间,又成为负载,大力矩、小体积、重量轻的直接驱动电机的发展促进了关节的小型化发展;

4.1.3 高速度、高精度和高灵敏度 转动惯量小、机电时间常数低、定位精度高的微特电机的发展,适应了机器人定位精度高、快速响应的要求。

4.1.4 机电一体化 机构、控制电路、驱动电机、传

感器组成一体的伺服系统,可以达到最佳的耦合和匹配,从而更好地满足了机器人高精度、小体积、轻量化的要求。

4.1.5 一些新原理、新结构、机电一体化、超微型化的关节不断出现 一些其他传动机构也会应用于机器人关节,如,活齿传动机构,逆螺旋传动机构等。随着新型驱动器的发展,如人工肌肉, SMA, 压电陶瓷驱动等,以及一些微机电系统的关节机构也不断出现。

参 考 文 献

- 1 马香峰. 工业机器人操作机设计. 北京:冶金工业出版社,1996
- 2 蔡鹤皋等. 机电一体化技术手册. 北京:机械工业出版社,1999
- 3 Arimura Yoshiaki, Multi - joint arm. America. US4631689,1986
- 4 辻 三郎等. 机器人工程学及应用. 北京:国防工业出版社,1989
- 5 Rosheim Mark. robot joints. America: US4821594,1989
- 6 Stopa Frank. universal joint. Germany: DE19822344, 1999
- 7 Matsuda Hiroshi. elbow joint. Japan: JP10225881, 1998
- 8 杨宜民. 新型驱动器及应用. 北京:机械工业出版社,1999
- 9 Rosheim Mark. robot wrist. America, US5036724,1991
- 10 苏仲飞等. 机器人关节用三自由度球形直流伺服电机. 高技术通讯,1994(8)16 - 18
- 11 Matsuda Hiroshi. elbow joint. Europe, EP1207024,2002
- 12 Philippe Sardain et al. An anthropomorphic biped robot dynamic concepts and technological design. IEEE TRANSACTION, VOL. 28, NO. 6, NOVEMBER,1998
- 13 K. Berns et al. ARMAR - an anthropomorphic arm for humanoid service robot. Detroit, Michigan, ICRA, 1999
- 14 B. Espiau et al. The anthropomorphic biped robot BIP2000. San Francisco, Proc. ICRA 2000
- 15 R. Sellaouti et al. Design of a 3 DOFs parallel actuated mechanism for a hip joint. Washington DC, Proc. ICRA 2002
- 16 Iskarous M. climber robot. America, US5551525,1996
- 17 Jin ichi Yamaguchi et al. Design of biped walking robots having antagonistic driven joints using nonlinear spring mechanism. Grenoble, France, Proc. IROS 97 IEEE
- 18 Ammon K. Wright. Kinematics mapping between the EXOS Handmaster exoskeleton and the Utah - MIT dextrous hand. IEEE, 1990
- 19 Shirai Takeki. joint structure. Japan, JP2002113681,2002
- 20 LIN LI - REN. Mechanism design of a new multifingered robot hand. Minneapolis, Minnesota, Proc. ICRA,1996
- 21 J. N. Sarris et al. Development of a simple anthropomorphic robot hand using shape memory alloys. London, IEEE, 1995
- 22 宗光华. 新型机构撑起智能机器人. 机器人技术与应用,2001(4)8 ~ 10

收稿日期:20031117

基金项目:国家 863 机器人技术主题资助项目(2002AA423140)

作者简介:王光建(1973 -),男,四川渠县人,讲师(助研)

ABSTRACTS & KEY WORDS

JOURNAL OF MECHANICAL TRANSMISSION Vol.28, No.4, 2004

The Present State and Developing Tendency of Robot Joint

..... Wang Guangjian, Liang Xichang, Jiang Jiandong(1)

Abstract Robot joint, whose performance will directly affect robot, is a basic part of robot. This paper presents the classification of robot joint according to driving method, characteristic of function, the application occasion and its main structure. The typical structural form of robot joint is introduced, and the joint structure of industrial and anthropomorphic robot is especially concerned. The technology of robot joint is developing continually with the development of electronic technology such as digital servo and so on. There seems a tendency of big moment, high accuracy, fast and sensitive response, miniaturization, electromechanical integration, standardization and modularization and so on, which is adapted to the development of robot technology.

Key words: Robot joint Developing tendency Actuator

PD Trajectory Control of Mass Balanced Hybrid Planar Five-bar Mechanism

..... Wei Hong, Xie Jin, Chen Yong(6)

Abstract Based on analyzing the dynamic model of hybrid planar five-bar mechanism and using the mass-redistribution scheme, which follows the concept of design for control (DFC) methodology, a simple dynamic model is obtained. A conventional proportional-derivative algorithm is used, simulation studies on cases of mass balanced and mass unbalanced verify that the motion tracking performance of mechanism is significantly improved by applying the DFC methodology than traditional design methodology.

Key words: Hybrid Planar five-bar mechanism Mass-redistribution PD control

The Research for Heat Transfer of Hydraulic Transmission Device

..... Xu Xiang, Bi Xiaoping(9)

Abstract Through analyzing of the heat sources and the process of heat transfer hydraulic transmission device, the simulative model of hydraulic torque converter, planetary transmission and other gearings was established. The power loss, quantity of heat and the temperatures were calculated by using the procedure. The results showed that the method was feasible, and the model had a good imitate accuracy as well as could be used to calculate the heat transfer other types of hydraulic transmission device.

Key words: Hydraulic transmission device Heat balance Heat transfer Simulation

The Fuzzy Optimum Design of the Fold Spring Coupling Based on Genetic Algorithm

..... Guo Wei, Zhao Shuanfeng, Yang Guihong(13)

Abstract Considering the limitation of traditional mechanical optimum design, a new fuzzy modeling, model transforming and genetic algorithm

resolving, method is presented and an example about the fuzzy optimum design of the fold spring coupling is given.

Key words: Fuzzy optimization Genetic algorithm Fold spring coupling

Optimum Design of Elliptic Gear Drive

..... Wang Shujie, Lu Xinsheng (17)

Abstract Elliptic gear is used for gear drive with variable speed ratio, but it is complex in design and calculation. This paper introduced the optimization method for the design of elliptic gear-drive. It can improve design efficiency and accuracy of elliptic gear drive.

Key words: Elliptic gear drive Optimization Goal programming

Central Distance Optimum Design of Gear Pair with Positive Modification

..... Dong Tingjian Wang Taiyong Wang Wenjin Wu Yuxia(19)

Abstract This paper analyze the relationship between gear modification coefficient and load capacity of surface durability, and the mathematics model of optimum design is set up according to object function that is the maximum numeric value of modification coefficient. The central distance of gear is optimized according to principle that load capacity of surface durability is the maximum value, it can offer some help for design of meshing gear.

Key words: Central distance Optimum design Gear Positive modification

The Optimal Design of Four Bar Mechanism Based on Genetic Algorithm

..... Cui Yanmei Wang Liping Fu Kunxia(22)

Abstract Genetic Algorithm is an global optimal algorithm, which is based on the random seeking of the theory of evolution, natural selection and the theory of inherency. This algorithm is suit for handling the complex and nonlinear optional problems. In this paper, it is used to the optimum design of four-bar mechanism with given motion track and multi-constraints. To avoid the local convergens and get the global solution, only partial constraints are employed in early optimization. The feasibility and effectivity of this method are also verified.

Key words: Genetic Algorithm Mechanism Optimal design

Common V-belt Transmission Optimal Design Based on Genetic Arithmetic

..... Li Na, Ye Feng(26)

Abstract In the design of common V-belt transmissional, the traditional method has disadvantage of low calculation precision and it is difficult to find the optimal solution. In this paper, the genetic arithmetic (GA) is used to optimize the design of common V-belt transmission to reach the minimum volume.

Key words: Common V-belt transmission Genetic arithmetic Optimal design