

多操作机排牙机器人的高精度运动控制

张永德, 彭景春, 姜金刚

(哈尔滨理工大学智能机械研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 根据多操作机排牙机器人的结构特点及其高精度运动控制的要求, 并结合软、硬件控制的特点, 确定了通过软件来实现多操作机排牙机器人高精度运动控制的方案. 通过对多操作机排牙机器人控制系统的研究, 分析了影响控制精度的各个环节, 提出了预设定时和实时定时的两种控制软件实现方法. 通过测试及排牙控制实验对两种实现方法的控制精度及稳定性进行了比较分析, 验证了实时定时的控制软件实现方法可实现多操作机排牙机器人的高精度运动控制.

关键词: 多操作机排牙机器人; 步进电机; 软件控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

High Precision Motion Control for Multi-manipulator Tooth Arrangement Robot

ZHANG Yong-de, PENG Jing-chun, JIANG Jin-gang

(Intelligent Machine Institute, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: According to the structural characteristics and high precision motion control of multi-manipulator tooth arrangement robot, and with the combination of the characteristics of software and hardware control, this paper presents a high precision motion control scheme based on software for the multi-manipulator tooth arrangement robot. Based on the research on control system of the multi-manipulator tooth arrangement robot, each link influencing the control precision is analyzed, and two software realization methods of presetting timing and real-time timing are presented. Control precision and stability of the two methods are analyzed with test and experiment on tooth arrangement control, and it is concluded that high precision motion control for multi-manipulator tooth arrangement robot can be realized with the real-time software realization method.

Keywords: multi-manipulator tooth arrangement robot; stepping motor; software control

1 引言 (Introduction)

医用机器人技术的一个重要发展方向是医用排牙机器人全口义齿的修复, 而多操作机排牙机器人的研制成功将为口腔修复医学提供一种高效率、高质量、自动化的全口义齿制作设备, 改变了传统的手工操作模式, 实现了全口义齿排牙的数字化和定量化, 避免了手工技师因疲劳、情绪、疏忽等原因造成的失误, 确保了义齿的质量, 提高了工作效率, 同时克服了单操作机排牙机器人的定位困难、定位精度低、排牙时间长、效率低等缺点^[1~3]. 在多操作机排牙机器人的设计中, 考虑到排牙机构的控制精度和造价等问题, 多操作机排牙机器人采用了 50 个步进电机来实现 14 颗牙齿的 70 个自由度的控制. 其整体结构可分为上、中、下三层, 上层由 14 个步进

电机组成, 主要用来控制人工牙列的 14 颗散牙的近远中向转动; 中层为 8 个步进电机, 两两并联, 支撑 U 型弹簧板, 14 个相互独立的操作机可在 U 型弹簧板上自由地滑动, 每一个操作机具有 3 个自由度; 下层为 28 个步进电机, 两两一组, 以此来控制各个散牙的唇舌向转动以及上下移动, 其结构简图如图 1 所示.

要完成步进电机的位置、速度和方向控制, 既可以使用软件来实现, 也可以用硬件电路实现^[4,5]. 硬件电路控制精度虽然很高, 但是需要增加硬件资源, 尤其要对多操作机排牙机器人的 50 个步进电机进行控制, 就需要增加更多的硬件资源. 本文采用软件方法来实现多操作机排牙机器人步进电机的控制, 其控制系统框图如图 2 所示.

由多操作机排牙机器人的控制系统框图可以看

出,多操作机排牙机器人的运动控制精度主要由系统的控制软件、开关量接口卡、驱动器、步进电机等几个环节来决定.其中,开关量接口卡选用中泰提供的 PC-6401 卡,驱动器由常州双杰电子有限公司提供,步进电机选用常州丰源微特电机有限公司的精密型永磁式减速步进电机.由于开关量接口卡、

驱动器、步进电机都是市场上商品化的产品,所以这几个环节对多操作机排牙机器人的运动控制精度产生的影响较小,在此不做讨论.本文仅对系统的控制软件进行研究,提出一种精度更高、稳定性更好的可用于多操作机排牙机器人高精度运动控制的软件实现方法.

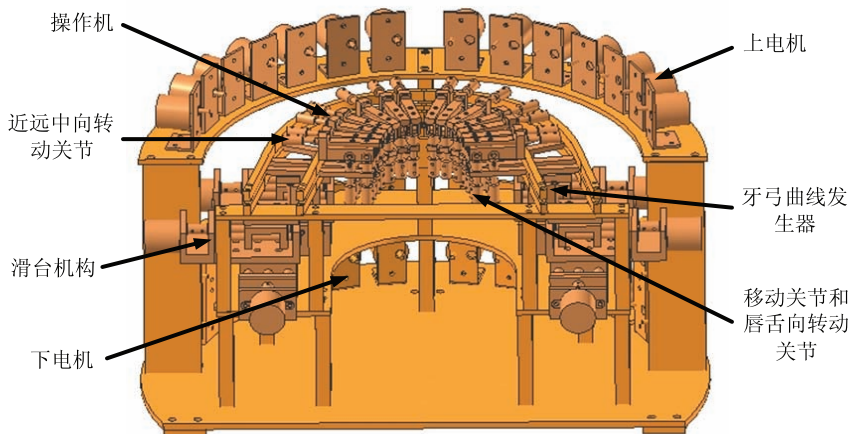


图 1 多操作机排牙机器人结构简图

Fig.1 Structure of the multi-manipulator tooth arrangement robot

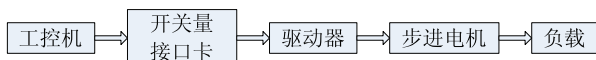


图 2 多操作机排牙机器人控制系统框图

Fig.2 Control system of the multi-manipulator tooth arrangement robot

2 多操作机排牙机器人控制软件的不同实现方法及其比较分析 (The different realization methods and comparative analysis of control software for the multi-manipulator tooth arrangement robot)

多操作机排牙机器人控制软件的核心功能是向实现排牙控制的步进电机输入一系列的方波脉冲信号,其实质是利用软件定时技术实现方波脉冲信号的输出.Windows 操作系统提供了 *Sleep()*、*GetTickCount()*、*TimeSetEvent()*、*QueueTimer()* 等多种定时 API 函数,可以采用这些 API 函数来实现软件定时^[6~9],虽然这几种函数的定时效果已经能够满足许多场合的实际要求,但由于它们的精度只有毫秒级,在要求定时时间间隔很小时,实际定时误差会很大,所以在精确度要求更高的定时操作场合,则需要使用定时精度更高的定时函数。*QueryPerformanceFrequency()* 和 *QueryPerformanceCounter()* 是 Windows 95 及其后续版本提

供的两种定时函数,其精度与 CPU 的时钟频率有关,要求计算机从硬件上支持精确定时器,它们都是对系统计数器进行访问,对于不同计算机,系统计数器的频率可能不一样.函数 *QueryPerformanceCounter()* 读取系统计数器中的计数值,返回一个存有计数值的 LARGE-INTEGGER 类型的结构体,这个结构体代表 64 位的整型变量;函数 *QueryPerformanceFrequency()* 读取系统计数器频率,返回一个存有频率值的 LARGE-INTEGGER 类型的结构体.利用这两个函数进行定时比较简单实用,而且定时精度很高,经测试,能达到至少 10 μs 的精度^[10],计算机运行速度越快,精度越高.本文分别采用预设定时和实时定时两种不同控制软件实现方法来实现多操作机排牙机器人的排牙控制,将上述两个定时函数分别嵌套在这两种控制软件中,提高定时精度,并比较分析这两种控制软件的控制精度和稳定性.

2.1 预设定时软件实现方法

预设定时软件实现方法的核心思想是采用 for 循环消耗所需的延时时间.延时时间的长短,即分别保持高、低电平的时间长短,由步进电机的工作频率决定,所以可以根据步进电机的工作频率得到一个方波脉冲的周期,从而可以计算出保持高低电平所需的延时时间.由于 for 循环的特点是必须已知循环次数,所以用上述方法计算出的延时时间除

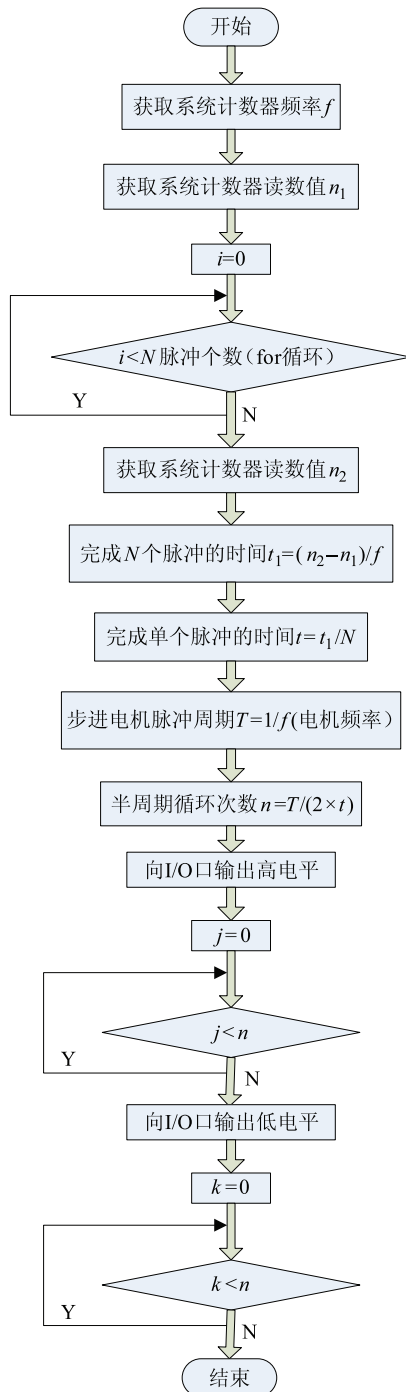


图 3 预设定时软件实现方法实现一个脉冲输出的流程图
Fig.3 Flow chart of realizing a pulse output for the presetting timing realization method

以一次循环的时间就可以得到这段延时时间所需的循环次数，从而实现定时。这个方法的关键是准确获得一次循环的时间，这个时间就是预设时间。首先调用 *QueryPerformanceFrequency()* 函数取得精确定时器的频率 f ，此数值一般很大；然后在 N 次 for 循环代码的两端分别调用 *QueryPerformanceCounter()* 函数，以取得精确定时器的计数值 n_1 、 n_2 ，利用两次计数器计数值的差值和计数器频率 f 可以换算出 N

次循环时间间隔 $t (t = \frac{n_2 - n_1}{f})$ ，通过 N 次循环的时间间隔可以得到预设时间，即 $t_1 = \frac{t}{N}$ 。经过多次测试，可以得到精度较高的预设时间。然后通过 for 循环延时先后向 I/O 口输出高低电平，从而可以完成一系列方波脉冲的输出。预设定时软件实现方法实现一个脉冲输出的流程图如图 3 所示。

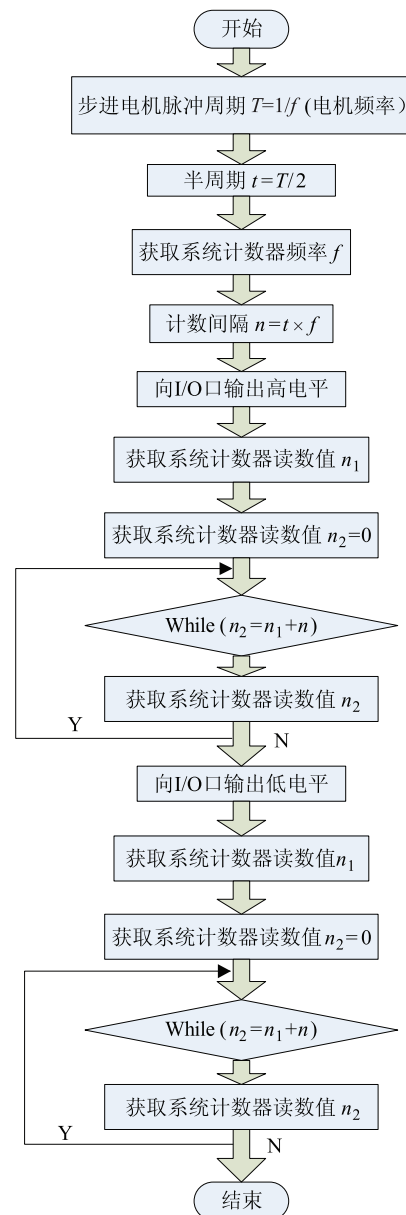


图 4 实时定时软件实现方法实现一个脉冲输出的流程图
Fig.4 Flow chart of realizing a pulse output for the real-time timing realization method

2.2 实时定时软件实现方法

实时定时软件实现方法的核心思想是采用 while 循环消耗所需的延时时间。这里不必像预设定时软件实现方法那样先确定预设时间，而是在循环等待的过程中实时判断延时时间是否到达。首

先调用 *QueryPerformanceFrequency()* 函数取得精确定时器的频率 f , 根据计数器的频率 f 和半个脉冲周期的时间间隔计算出系统高精度计数器的计数间隔数. 在 *while* 循环代码之前调用一次 *QueryPerformanceCounter()* 函数以取得精确定时器的计数值 n_1 , 然后在 *while* 循环代码之中调用 *QueryPerformanceCounter()* 函数以取得精确定时器的当前计数值 n_2 , 当获取的系统计数当前值 n_2 超过 n_1 与计数间隔数之和时, 则跳出 *while* 循环, 向 I/O 口输出高电平, 再利用同样的循环向 I/O 口输出低电平, 从而可以完成一系列方波脉冲的输出. 实时定时软件实现方法实现一个脉冲输出的流程图如图 4 所示.

2.3 两种控制软件实现方法的比较分析

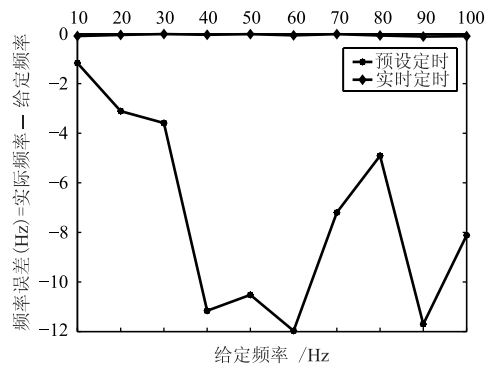
根据步进电机的矩频特性, 其最大动态转矩随着脉冲频率的升高而降低, 将步进电机的工作频率范围设定为 10 Hz~10000 Hz, 在这个频率段上可以保证送经电机有较大的出功能力. 由于随着频率的升高, 频率误差逐渐变大, 为清晰起见, 以下又将工作频率范围细分为 10 Hz~100 Hz、100 Hz~1000 Hz 和 1000 Hz~10000 Hz 三个频率段. 在这三个频率段内分别通过 VC++ 编程对两种软件实现方法进行脉冲频率精度测试, 其测试界面如图 5 所示.



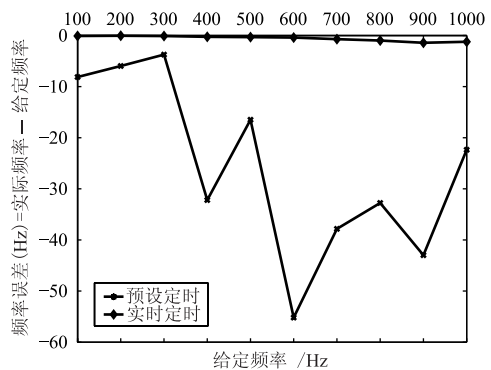
图 5 两种方法实现脉冲频率精度测试
Fig.5 Test for pulse frequency precision of the two realization methods

在给定的三个频率段内, 两种软件实现方法的最大、最小误差如图 6 和图 7 所示. 纵坐标为频率误差, 频率误差 (Hz)= 实际频率 - 理论频率, 理论频率即为横坐标的给定频率 (Hz). 从图中可以看出, 无论是预设定时软件实现方法还是实时定时软件实现方法, 其在 10 Hz~100 Hz、100 Hz~1000 Hz 小频率段间, 在给定的频率下的最大、最小误差较小, 而随着频率的升高, 最大、最小误差都逐渐变大. 同时可以看出, 实时定时软件实现方法产生的最大最小误差总是相对小于预设定时软件实现方法产生的最大最小误差, 而且实时定时的实现方法输出的频率相对稳定, 波动小, 误差曲线基本与零线重合; 相反

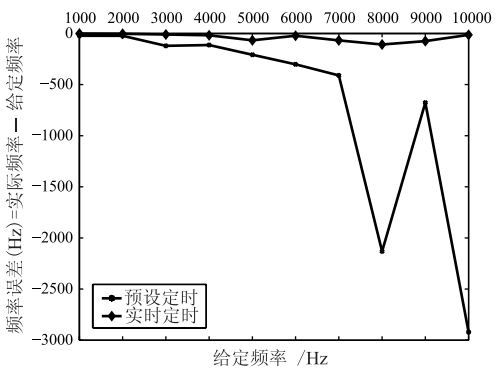
预设定时实现方法输出的脉冲频率随机性很大, 没有一定的规律性, 波动大, 误差曲线远离零线.



(a) 10 Hz~100 Hz 频率段



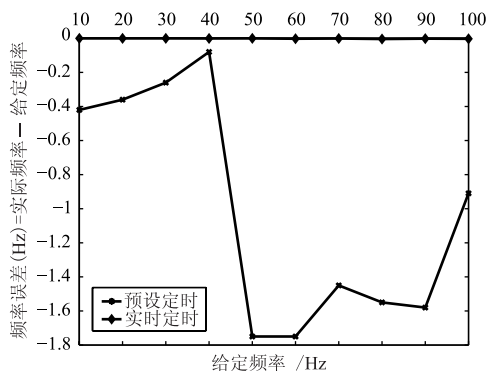
(b) 100 Hz~1000 Hz 频率段



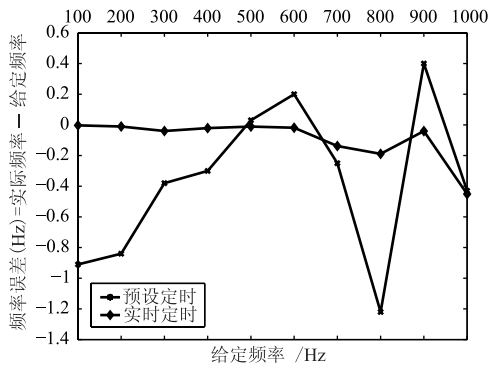
(c) 1000 Hz~10000 Hz 频率段

图 6 不同频率段最大误差比较

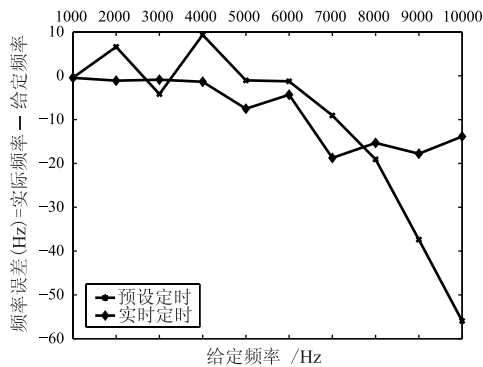
Fig.6 Comparison for maximum errors in different frequency ranges



(a) 10 Hz~100 Hz 频率段



(b) 100 Hz~1000 Hz 频率段

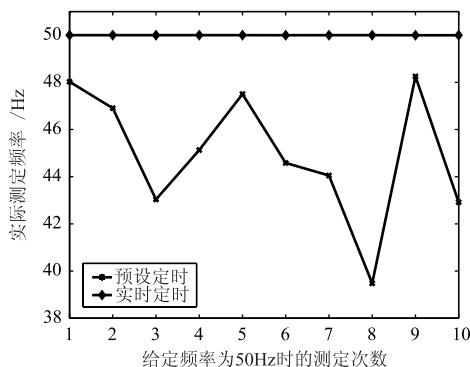


(c) 1000 Hz~10000 Hz 频率段

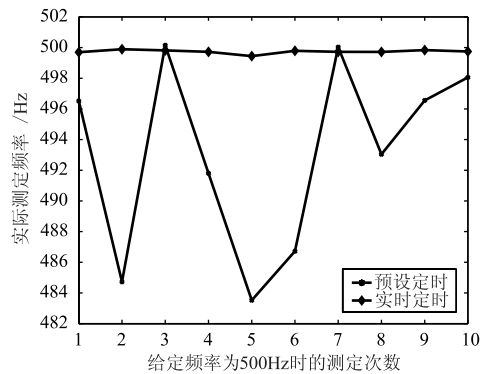
图7 不同频率段的最小误差比较

Fig.7 Comparison for minimum errors in different frequency ranges

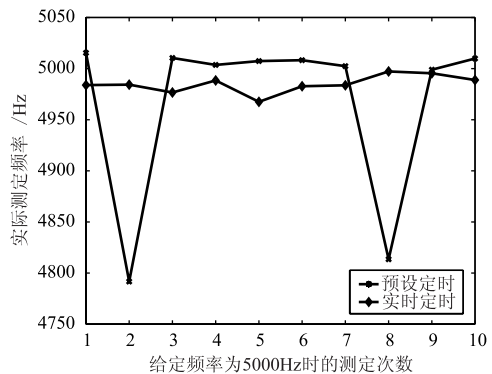
为了进一步分析两种软件实现方法的稳定性,在 10 Hz~100 Hz、100 Hz~1000 Hz 和 1000 Hz~10000 Hz 三个频率段内取 50 Hz、500 Hz、5000 Hz 三个频率值分别进行 10 次测试,如图 8 所示,横坐标分别为三个频率段内给定的固定频率值的测试次数,纵坐标为实际测定的频率 (Hz). 从图中明显看出,预设定时软件实现方法输出的方波脉冲频率随机性很大,实际测定的频率与给定频率大幅度偏离;实时定时软件实现方法相对要稳定得多,基本接近给定频率,尤其在小频率段内,实际测定的频率与给定频率基本吻合.



(a) 10 Hz~100 Hz 频率段取 50 Hz



(b) 100 Hz~1000 Hz 频率段取 500 Hz



(c) 1000 Hz~10000 Hz 频率段取 5000 Hz

图8 不同频率段稳定性分析

Fig.8 Stability analysis in different frequency ranges

综上所述,无论是在误差还是稳定性方面,实时定时软件实现方法控制的效果都好于预设定时软件实现方法,其主要原因是预设定时软件实现方法的预设时间随机性大,无法精确获得.

3 排牙控制实验 (Tooth arrangement control experiment)

以上通过测试对两种软件实现方法进行了分析比较,现将两种软件实现方法通过 VC++ 编制成相应的多操作机排牙机器人的控制程序,并进行排牙控制实验.多操作机排牙机器人排牙控制实验平台如图 9 所示,图 10 为多操作机排牙机器人结构中滑台机构的实验控制界面.

通过多次反复实验,结果表明,多操作机排牙机器人通过实时定时的软件实现方法输出的脉冲频率稳定性好,精度高,能够使滑台机构上的多操作机进行平稳移动,移动效果好,位移和速度可达到实验要求,极好地实现了排牙实验的预期效果;而预设定时的实现方法由于其输出脉冲频率的精度随机性很大,基本不能顺利完成一次排牙,与排牙的预期位置相差甚远,此方法不可用于实际排牙控制.因此,实验结果表明,实时定时的软件实现方法可

实现多操作机排牙机器人的高精度运动控制。

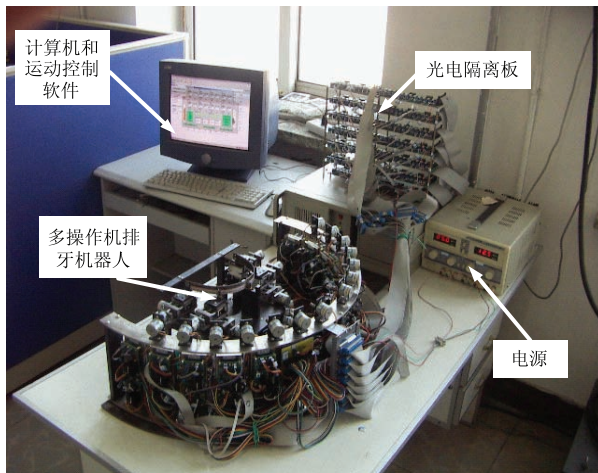


图 9 多操作机排牙机器人排牙控制实验平台

Fig.9 Experimental platform for tooth arrangement control for multi-manipulator tooth arrangement robot



图 10 多操作机排牙机器人滑台机构的控制界面

Fig.10 Control interface for slide mechanism of multi-manipulator tooth arrangement robot

4 结论 (Conclusion)

基于多操作机排牙机器人高精度运动控制的要求,本文阐述了预设定时和实时定时的两种控制软件实现方法,并通过测试和排牙实验对这两种实现方法的控制精度和稳定性进行了比较分析.分析比较的结果表明,实时定时软件实现方法的控制精度和稳定性都要好于预设定时软件实现方法,可以实现多操作机排牙机器人的高精度运动控制要求。

参考文献 (References)

[1] Wang H Y, Zhang L Y, Zhang Y D. Study on simulation system of tooth arrangement robot based on simmechanics[A]. Proceedings of the 6th International Symposium on Test and Measurement[C]. Beijing, China: World Publishing Corporation, 2005. 7360~7363.

- [2] Zhang Y D, Zhao Z F, Lu P J, *et al.* Robotic system approach for complete denture manufacturing[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(3): 392~396.
- [3] 张永德. 机器人化全口义齿排牙技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- Zhang Yong-de. Robotic complete denture tooth arrangement technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.
- [4] 周明安, 朱光忠, 宋晓华, 等. 步进电机驱动技术发展及现状 [J]. 机电工程技术, 2005, 34(2): 16~17.
- Zhou Ming-an, Zhu Guang-zhong, Song Xiao-hua, *et al.* The development and actuality on stepmotor driver[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2005, 34 (2): 16~17.
- [5] 周忠辉. 步进电机驱动的实现方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2004, (11): 61~62.
- Zhou Zhong-hui. Way to drive stepper motor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2004, (11): 61~62.
- [6] 侯明, 王东兴. Windows 系统高精度定时方法研究 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(3-3): 262~264.
- Hou Ming, Wang Dong-xing. Research on applications of Windows's high precise timer[J]. Microcomputer Information, 2006, 22(3-3): 262~264.
- [7] 李凯南, 梁高卫. 基于 Windows 精确计时系统研究 [J]. 电脑知识与技术 (学术交流), 2006, (6): 151~152.
- Li Kai-nan, Liang Gao-wei. Research of accurate timing mechanism in control system based on Windows[J]. Computer Knowledge and Technology (Academic Exchange), 2006, (6): 151~152.
- [8] 郭占社, 孟永钢, 苏才钧, 等. 基于 Windows 的精确定时技术及其在工程中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1717~1720.
- Guo Zhan-she, Meng Yong-gang, SU Cai-jun, *et al.* Windows based precise timing technology and its engineering applications[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1717~1720.
- [9] 吴剑锋, 陆军华, 王文. Windows 系统控制软件实时性实现的一种方法 [J]. 机床与液压, 2005, (12): 127~129.
- Wu Jian-feng, Lu Jun-hua, Wang Wen. A method to realize the real-time control under the Windows system[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2005, (12): 127~129.
- [10] 潘石柱, 刘海峰. VC++6.0 环境下工控软件设计中的时间控制 [J]. 江苏冶金, 2003, 31(2): 13~15.
- Pan Shi-zhu, Liu Hai-feng. The time control in design of industrial control software based on VC++6.0[J]. Jiangsu Metallurgy, 2003, 2(31): 13~15.

作者简介:

张永德 (1965-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 医用机器人, 服务机器人, 仿生机器人, 多指灵巧手.

彭景春 (1975-), 女, 硕士生. 研究领域: 机器人控制技术.

姜金刚 (1982-), 男, 硕士生. 研究领域: 机器人控制技术.