

doi: 10.7690/bgzdh.2015.05.020

同步仿生机械臂设计

张昊^{1,2}, 王超亮^{1,2}, 田文龙¹, 李擎^{1,2}

(北京信息科技大学智能控制研究所, 北京 100101; 2. 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101)

摘要: 针对目前机械臂的应用存在操作复杂、设计繁琐等不足, 设计一套由 MCU、加速度计、直流舵机和臂环等构成的同步仿生机械臂。介绍系统总体设计, 通过信号转换算法使采集信号转换为驱动舵机转动的 PWM 控制信号, 采用程序消抖算法进行优化, 并进行实验验证。结果表明: 该仿生机械臂控制灵活, 使用简单, 成本低廉, 可推广应用于仿人手臂运动作业、主从机械臂系统的研究领域。

关键词: 同步; 机械臂; 加速度计; 舵机

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Design of Synchronous Bionic Arm

Zhang Hao^{1,2}, Wang Chaoliang^{1,2}, Tian Wenlong¹, Li Qing^{1,2}

(1. Institute of Intelligence Control, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China;

2. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing 100101, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of complex operation and excessively detailed design, design a synchronous motion bionic arm which is composed by the MCU, accelerometers, DC servos and arm rings. Introduce the system overall design, through signal change algorithm, change choosing signal into PWM control signal for driving actuator running. Carry out optimization by using program chattering elimination algorithm. Then, carry out test verification. The result shows that the bionic arm control is nimble, easy to use with low cost. It can be used fields such as bionic arm operation, master-slave manipulator system and so on.

Keywords: synchronization; robotic arm; accelerometer; actuator

0 引言

仿生机械臂是当今科研领域及工业领域的研究前沿和热点, 兼有人行为意识和机械手的作业效能, 因此在军事、医疗、空间、工业和海洋等领域有着广泛的应用前景。然而, 目前在机械臂的应用中, 对于机械臂的操纵多为按键控制或者需要多个控制杆来控制一个机械臂的运动, 其设计繁琐, 操作复杂, 给操作者使用带来很大不便。

笔者利用固定在臂环上的加速度传感器采集人手臂运动信息, 由单片机对采集信号进行模数转换与滤波处理, 运用控制算法生成可以控制舵机运动的 PWM 波信号并输出至伺服舵机, 以此来实现四自由度机械臂的同步仿生运动的实验装置, 具有控制灵活和操纵简单的特点, 可为今后的仿人机械臂、多机械臂和主从机械臂等同步控制的研究提供一定的技术和理论支持。

1 系统总体设计

1.1 系统构成

整个系统共分为 3 个模块, 即控制器子系统模

块、机械臂子系统模块和采集器子系统模块。控制器选用 STC12C5A60S2 单片机, 利用 MMA7361L 加速度传感器来采集人手臂的运动信息, 然后经 A/D 转换控制芯片采集相应的数字量信号, 并编写控制算法程序调节输出 PWM 波的占空比, 进而实现控制相应舵机运动的目的。其系统框图如图 1。

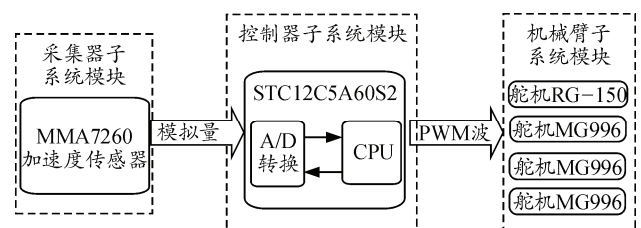


图 1 系统框图

1.2 采集器的选择与安装

由于是与人手臂同步运动的机械臂, 所以本设计采用具有高精度采集信号的三轴加速度传感器 MMA7361L 作为人手臂运动信息采集模块。MMA7361L 是一种具有超低功耗、高灵敏度和小型电容式特点的微型机械加速度传感器^[1], 不仅可以对物体运动方向进行检测, 还可以对物体运动姿态

收稿日期: 2015-02-13; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61261160497)

作者简介: 张昊(1991—), 男, 北京人, 在读硕士, 从事模式识别和机器人的智能控制的研究。

进行识别。

使用 MMA7361L 加速度传感器实现角度测量，其核心原理是建立传感器输出电压和当前角度之间的函数映射关系。零倾斜角度的选择对于测量仪的精度影响比较大，故以该传感器 X 轴方向的倾角计算为例加以说明，其余两轴的角度测量原理类似。取传感方向 X 轴与重力加速度 g 垂直时的状态为零倾斜角度，当倾角为 θ 时，X 轴方向倾角测量图示如图 2 所示。

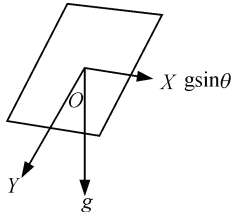


图 2 X 轴角度测量示意图

从图 2 中分析可以得出：重力加速度在 X 轴的分量为 $g\sin\theta$ ，由于传感器的加速度分量与其电压成正比，在文中传感器模式选择 1.5g 模式，并且其精度是 800 mV/g，因此测量角度可由以下公式获得：

$$\theta = \arcsin \frac{V}{800} \quad (1)$$



图 3 传感器的安装示意图

通过四路加速度传感器 MMA7361L 对手臂的位置信息进行采集，单片机处理器对采集信号进行处理。每一个 MMA7361L 含有三路信号输出(X 轴、Y 轴、Z 轴)，基准输出电压为 1.65 V，输出信号经过单片机的 A/D 模块模数转换后，可以通过程序计算出舵机的控制信号。本设计中采用 4 个加速度传感器，每个加速度传感器只利用其中一个较精确的轴采集信号，控制单路舵机运行。经过三轴数据采集范围分析以及放置位置的容易程度对比后，这里三路采用 X 轴信号输出，一路采用 Y 轴信号输出作为采集结果。选择四路单通道传感器采集位置

信息，需要在 4 个关节处放置传感器。由于肩部灵活度包括前后摆和上扬动作，肘部包括一个回转动作、腕部的扭转关节，这里将前 2 个传感器安放在肩关节附近，第 3 个传感器放置肘部偏下，最后一个传感器放在腕部。考虑到移植性等因素，最后将 4 个传感器安装固定在臂环上，具体安装位置如图 3 所示。

1.3 机械臂子系统

机械臂子系统由机械臂框架和舵机组成。其中在机械臂框架的搭建时需注意在不影响整个机械臂同步运动的同时，应尽可能使用短 U 型支架来减小肩关节的自身力矩，以减轻舵机的负载和防止舵机出现大幅度抖动。

舵机是整个机械臂的动力系统，舵机的控制效果是影响整个系统性能的重要因素^[2]。在选择舵机时，考虑到机械臂过长、舵机输出扭矩不够等因素，本设计在机械臂的肩关节处选用奥松舵机 RB-150MG，该款舵机在额定电压 6 V 的情况下输出力矩为 15 kg·cm。而在其他 3 个关节处则选用相对较便宜的辉盛 996R 舵机，以降低成本。此舵机在额定电压 6 V 时输出力矩为 11 kg·cm。整个机械臂子系统安装完成后的效果图如图 4 所示。

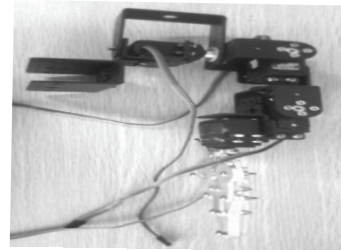


图 4 机械臂子系统示意图

2 系统软件设计

2.1 控制信号转换

由加速度传感器采集的信号经过中位值平均滤波后作为控制信号的原始数据。加速度传感器 MMA7361L 的数据采集范围为 0x2c~0x80，而作为舵机控制信号输出时的范围为 0x35~0xff(对应 0.5~2.5 ms 的控制信号)，这里采用线性化数据处理方法进行数据处理，线性化处理公式如下：

$$(x - 0x35) / 0xca = (y - 0x2c) / 0x54 \quad (2)$$

式中： x 表示 PWM 波控制信号输出； y 表示加速度传感器采集信号输入。经过调试，4 个舵机的运动角度不同，控制信号输出范围也不同。4 个舵机的控制信息如表 1 所示。

表 1 控制信号转换信息

舵机编号	上升沿时间/ms	控制信号计数输出值	传感器采集信号
1	0.6~2.2	0x41~0xe8	0x2c~0x80
2	0.5~2.5	0x35~0xff	0x2b~0x7b
3	1.05~2.3	0x6f~0xf1	0x2b~0x7f
4	0.6~2.3	0x41~0xf1	0x2b~0x7e

四路舵机的数据转换公式整理后为

$$x_1 = (\text{float})0xa3 / 0x54 \times (mma - 0x2e) + 0x41 \quad (3)$$

$$x_2 = (\text{float})0xca / 0x54 \times (mma - 0x2b) + 0x35 \quad (4)$$

$$x_3 = (\text{float})0x82 / 0x50 \times (mma - 0x2b) + 0x6f \quad (5)$$

$$x_4 = (\text{float})0xb0 / 0x52 \times (mma - 0x2b) + 0x41 \quad (6)$$

这里需在每一个除式前加 (float) 强制类型转换符, 使 0x21/0x53 运算时不至于为 0, 也可以不加该强制转换符, 但必须将除数写在最后, 这样所得结果才会正确。

2.2 PWM 波的生成与调制

单片机系统要实现舵机输出转角的控制, 须首先完成 2 个任务: 1) 产生基本的 PWM 周期信号, 设计是产生 20 ms 的周期信号; 2) 脉宽的调整, 即单片机模拟 PWM 信号的输出, 且调整占空比^[3-4]。

本设计采用两路定时器中断的方式实现周期为 20 ms 的 PWM 波输出。这里有 2 种实现方案:

1) 设置 2 个定时器中断, 20 ms 的定时用定时器 1, 每次执行时打开定时器 0, 开始 0.05 ms 计时, 该中断里含有 8 条赋值语句, 执行时间为 8 个机器周期, 小于 0.05 ms, 定时器 0 中断不会影响其正常运行。定时器 0 的定时时间为 0.05 ms, 0.5 ms 时, count 值为 10 (即 0x0a), 2.5 ms 时 count 值为 50 (即 0x32)。当控制信号为 x 时, 该信号每隔 0.05 ms 与当前 count 值比较一下, 大于等于 count 值时, PWM 波输出位置高, 小于 count 值时将其拉低, 并判断四路 PWM 波输出口是否全部已经拉低, 若是的话, 则关闭定时器 0 (进入下一个定时器 1 时打开)。方案 1 运用定时器中断实现舵机的控制效果, 每当 20 ms 的周期到来, 就跳至中断执行 PWM 波输出管脚的拉高操作, 使控制信号能够很好地衔接输出, 可以实现对舵机的实时控制目的。

2) 同样运用两路定时器实现周期为 20 ms 的 PWM 波输出信号。但这里不再定时 20 ms, 而是将其分为 4 段时间, 每段 5 ms, 对应于四路 PWM 波输出。每个 5 ms 处理一路舵机控制信号, 使四路信号错开并持续输出, 这样可以避免每次中断到来时, 每一路的 count 值与控制信号的大小判断, 使程序实际运行指令减少。此外还有一个优点, 0.5~2.5 ms

的定时数值范围增大了。在 5 ms 的大定时周期内, 调节定时器 0 的初值, 使 2.5 ms 正好与 0xff 对应, 之后调节 loadval_x 的值, 使其与 0.5 ms 对应, 这样所得舵机控制信号范围为 0x35~0xff, 同方案 1 的取值范围 (0x0a~0x32) 相比, 增大了 5 倍, 从而使舵机控制精度也提高到了原来的 5 倍。故这里最终选用方案二作为舵机的程序控制算法, 其控制信号波形如图 5 所示, 其流程图如图 6 所示。

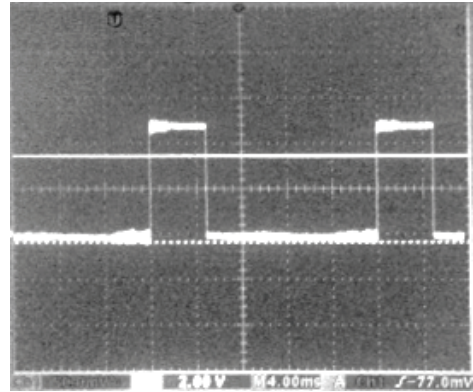


图 5 一路控制信号波形

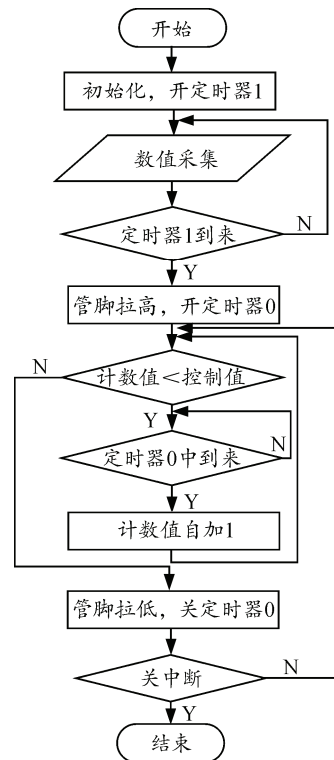


图 6 主程序流程

2.3 机械臂消抖优化

引起机械臂抖动的因素有很多, 本设计中主要包括硬件因素和软件因素。硬件因素为机械臂自身结构不够稳固, 一有振动, 容易引起全臂的颤动, 从而放大抖动效果。软件因素包括 2 方面: 1) 20 ms

PWM 波控制信号输出频率不稳定, 随着时间的增加, 每次控制周期误差会进行累加, 当到达一定程度时, 就会影响舵机的正常控制, 外部表现就是舵机抖动^[5]。2) 数字控制信号的范围太小: 控制信号变化范围越小, 控制精度就越低, 从而导致每发生一次单位控制信号变化, 舵机响应的角度越大, 抖动就越明显^[6]。以 180° 旋转角度舵机为例, 当所采用的控制信号变化范围为 $m \sim n$ 时, 控制信号每发生一个数值的变化, 舵机相应的变化角度就为 $180^\circ/(m-n)$ 。当 $m-n=40$ 时, 舵机控制精度为 4.5° , $m-n$ 的数值越大, 所得的舵机控制精度越高, 抖动也就越小。

基于以上分析, 本设计中采取的消抖措施: 1) 在硬件方面, 采取加固安装舵机与机械臂支架, 将舵机的两耳紧紧固定在舵机支架处, 并减小依靠肩部关节舵机旋转带动的机械臂重量, 进而可以减小其快速下摆后的冲力所引起的机械臂颤动。2) 在软件方面, 首先采用示波器测量调整 20 ms 方波定时输出, 获得最精确定时数值时记录此时定时器的重装值 TH1 与 TL1; 其次为了获得控制信号最大的输出范围, 在调试定时器 0 时, 先将计数值(这里用 count)设为 0xff, 调整 TH0 与 TL0 以实现 2.5 ms 高电平持续输出的效果, 然后记录此时的 TH0 与 TL0, 并调整 count 值, 实现 0.5 ms 高电平输出, 此时所得的 2 个 count 值即为本款单片机所能实现的最大范围控制信号输出最大值和最小值。改进程序后, 0.5~2.5 ms 的控制信号范围增大到 0x35~0xff, 舵机的控制精度提高到 0.9° , 控制信号小幅度变化时, 舵机受影响较小, 明显达到了改善机械臂抖动的现象。其机械臂末端与三轴夹角误差如图 7 所示。

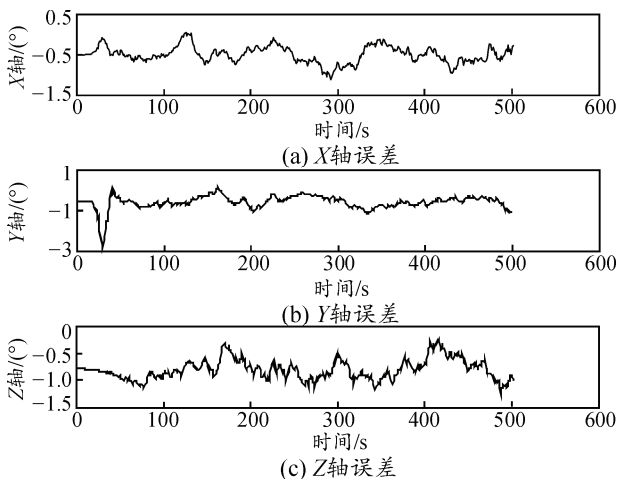


图 7 机械臂末端与三轴夹角误差

3 实验结果

将采集器子系统、控制器子系统及机械臂子系统分别进行最佳调整后, 将其整合在一起, 测试并记录整体运行结果。测试结果为该款机械臂可以完成前后摆臂、向上平伸、抬起大臂、肘部回环和腕部扭转等手臂基本动作, 实现了机械臂跟随手臂做同步运动的设计预期目标。整个系统的实际测试效果图如图 8 所示。

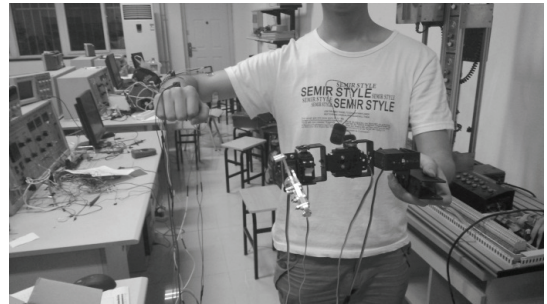


图 8 小臂回环动作

4 结束语

笔者基于单片机设计了一套能够与人手臂进行同步运动的仿生机械臂实验装置, 针对机械臂机电控制系统的特点, 构建了基于单片机——舵机控制的同步仿生机械臂控制模型, 编程实现了 STC 单片机对三轴加速度传感器的数据采集, 通过信号转换算法使采集信号转换为驱动舵机转动的 PWM 控制信号, 采用程序消抖算法进行优化, 使得整个机械臂运行稳定, 控制精度达到了 0.9° ^[6]。实验结果证明: 该设计方案可行, 并且该机械臂控制灵活, 使用简单, 成本低廉, 具有很强的工程应用参考价值。

参考文献:

- [1] Cheung, Edward Bing Chun D. Real-Time Motion Planning for Whole-Sensitive Robot Arm Manipulators[D]. Connecticut State: Yale University, 1990: 1-7.
- [2] 耶晓东. 基于单片机的简易机械手的设计[D]. 汉中: 陕西理工学院, 2009: 1-4.
- [3] 杜宝桢, 吴志荣, 陈光绒. MMA7361L 的高精度角度检测平台设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012(4): 49-54.
- [4] 马忠梅, 王美刚, 孙娟, 等. 单片机的 C 语言应用程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 42-83.
- [5] 时玮. 利用单片机 PWM 信号进行舵机控制[J]. 今日电子, 2005(11): 80-82.
- [6] 胡幸江, 陈国定. 机械臂控制实验系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010: 1-3.