

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.016

基于DSP的仿人形假手控制系统研究*

张可科,熊蔡华*,贺磊,熊大柱

(华中科技大学机械科学与工程学院,湖北武汉430074)

摘要:为解决假肢手控制系统复杂等问题,将欠驱动技术应用到假肢手的机械结构设计中,整个假手由3个电机驱动,手指结构选用绳索滑轮驱动方式。开展了对机械系统原理和结构的分析,提出了基于DSP的结构简单、开发周期短、具有力反馈的运动控制系统,该控制系统用于驱动各手指动作。介绍了控制系统的硬件实现方法和软件控制流程,硬件主要包括电平转换和传感器信号处理电路,共有两种类型、11个传感器,可为假手自主抓取中的感觉反馈提供数据;软件主要涉及事件管理器、模数转换模块的应用。最后对假手中的压力传感器进行了标定,并进行了假手抓取试验。研究表明,基于力传感器反馈的控制策略使得假手能够实现稳定包络抓取。

关键词:假手;控制系统;欠驱动技术;压力传感器;DSP

中图分类号:TP242;TH39 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)04-0450-04

Control system for prosthetic hand based on DSP

ZHANG Ke-ke, XIONG Cai-hua, HE Lei, XIONG Da-zhu

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at solving problems of the control system's complexity of prosthetic hands, the under-actuated technology was investigated in the mechanical design of the hand. The total hand was actuated by 3 motors, tendons and pulleys were chosen for the finger mechanisms. According to analysis of the principle and architecture of the mechanical system, methods of easy configuration, short time of development, and force feedback were established based on DSP. The function of driving the motion of the fingers was supported by the control system. The design of hardware and software of this system was given and the voltage changing and sensor processing circuit were mainly included in the hardware design. Two kinds, a sum of 11 sensors were equipped for automatic grasp control and sensory feedback. Event managers and analog-to-digital converters were applied in the software design. Force sensing resistor of the prosthetic hand was calibrated and the grasping ability was tested. The results indicate that control strategy based on the force feedback makes prosthetic hand fulfill stable envelope grasp.

Key words: prosthetic hand; control system; under-actuated technology; force sensing resistor; DSP

0 引言

理想的假手应在形状和功能上与真手一样,它不仅能替代人手的感觉和运动功能,而且还要像人手一样具有优美的外形,但目前的技术还远远达不到这个理想的要求^[1]。

随着机器人技术的飞速发展,一些研究者试图研制出更加精巧的灵巧手,研究的方法和手段主要包含4个方面:①人手基本生理结构的研究;②手爪模拟人手的结构和功能;③手爪感知系统的研究;④手爪控制方法的研究。目前该研究已取得了一些重要的成果,相继有一批著名的多关节多指灵巧手问世。作为

收稿日期:2012-12-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划("973"计划)资助项目(2011CB013300-G)

作者简介:张可科(1988-),男,江苏常州人,主要从事生肌电假肢手方面的研究。E-mail:wozhangkeke@gmail.com

通信联系人:熊蔡华,男,教授,博士生导师。E-mail:chxiang@mail.hust.edu.cn

残疾人假肢使用的假手,如加拿大的TBM手^[2],英国的I-limb手^[3]等,其结构简单,体积重量与人手相近,具有装饰功能。目前已投入使用的商用假手多数只有1~3个自由度。国内哈尔滨工业大学和德国宇航中心最新研制了集成度和拟人化程度高的五指仿人手,该手具有很强的操作能力,但质量有1.5 kg^[4],不适用于假肢场合。为了实时、有效地控制机器人多指手,机器人多指手自由度不宜过多^[5]。最近有研究称假肢手的最佳驱动数为3个^[6]。为了减少驱动数,一些假肢手尝试用一个电机驱动同时驱动拇指的弯曲和侧摆,例如MANUS手^[7],但是传动机构过于复杂。

传统驱动方式控制电路复杂、体积大,影响控制的可靠性,软件设计工作量也大^[8-9]。Shigeo Hirose于1978年首先提出了绳索式欠驱动机构,奠定了欠驱动研究的基础。欠驱动的基本原理是系统的驱动数少于自由度数。本研究将假手引入欠驱动机构,欠驱动机构的优势是给控制系统带来了方便,实现单个电机驱动多个自由度,实现对各种物体的包络自适应抓取。采用欠驱动机构设计原理后,外围电路简单,可靠性高,减少了电路板的尺寸。

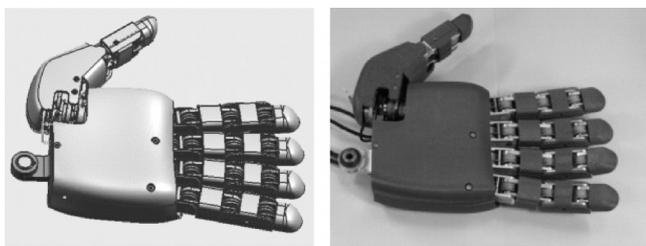
基于上述思想,本研究对欠驱动假肢手进行相关硬件电路的设计和软件的编写,并对假手中使用的压力传感器进行标定,在此基础上,对生活中不同物体进行包络抓取和捏取实验。

1 多自由度假手系统介绍

1.1 假手整体概述

为了完全仿人手,假肢手的设计要求为:体积小、重量轻、外形拟人;假肢手采用欠驱动机构,能完成各种日常的抓握操作。

本研究所研制的欠驱动耦合假手如图1所示。它共有5根手指,拇指2个关节,其他手指各3个关节,还包括拇指的侧摆运动,共15个活动关节,总重量约为550 g;和人手相比,其尺寸、重量和成年人人手相近。



(a) 假手UG

(b) 假手实物图

图1 欠驱动耦合假手

整个手掌15个自由度仅用3个电机驱动,机械结构主要包括:手指欠驱动机构、两手指间差动机构、大拇指侧摆机构。食指与中指由一个步进电机驱动,无

名指与小指由另一个步进电机驱动,通过移动滑轮差动机构来实现一个电机驱动两个手指。拇指通过将槽轮结构和曲柄连杆结构耦合,实现了仅用一个电机驱动拇指的侧摆和弯曲两个方向的运动。

本研究选用的步进电机具有自锁功能,以螺杆作为电机输出轴,在电机外部通过一个外部驱动螺母和螺杆相啮合从而实现直线运动。这样做的优点是大大简化了设计,使得系统能够在不安装外部机械联动装置的情况下直接使用直线步进电机进行精密的线性运动。传感器和电机都安装在手掌内部,减少钢丝绳路径布置的难度。

1.2 假手指机构方案选择

手指机构方案有两种:绳索滑轮驱动式和连杆驱动式。绳索滑轮驱动式特点:结构紧凑,关节力臂恒定,手指出力较小;连杆驱动式特点:结构不紧凑,关节力臂不恒定,手指易出现奇异形位,手指出力较大^[10]。最后假肢手选用绳索驱动方案。因为这种手指机构在抓握物体时,手指能够自动调节关节角度,完成对物体的包络,增加抓握的稳定性。

2 控制系统设计

假手控制系统设计的目标是:手指能够实现多种抓取模式;控制各手指电机运动,完成闭环控制;对其硬件要求是体积小、功耗低的嵌入式控制系统。

仿人手的控制系统结构如图2所示。系统以微处理器DSP TMS320 F2812为核心,实时地对传感器信号进行处理,完成各手指动作的协调运动及运动控制算法。

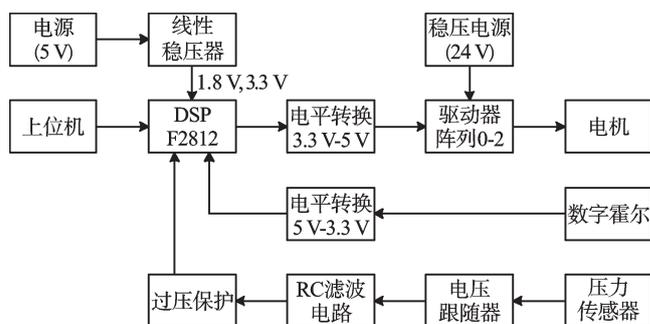


图2 假手控制系统结构

2.1 硬件实现

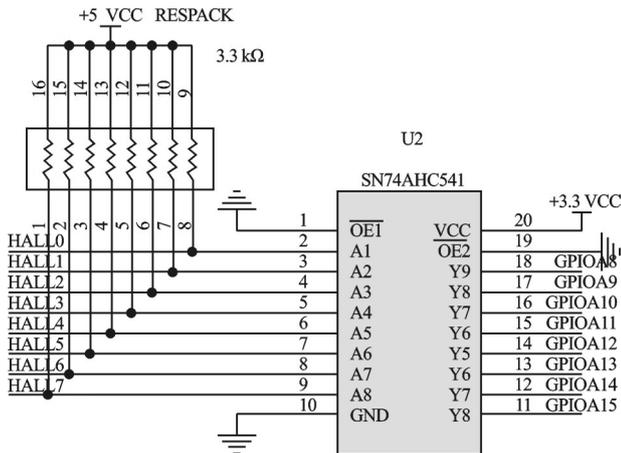
仿人手控制系统完成了手指的位置和压力信号采集,以及整个手掌的抓握控制。大拇指使用有刷直流伺服电机,实现拇指的侧捏与弯曲运动;其余手指使用直线步进电机,实现手指的抓握运动。DSP的事件管理器(EV)产生3路独立脉冲信号给3个电机驱动器,模/数转换器(ADC)接收压力传感器的模拟信号;通用输入/输出(GPIO)接收8个霍尔传感器的开关信

号。事件管理器 A(EVA)的定时器 1 用于启动 A/D; EVA 的定时器 2 用于产生脉冲信号给拇指伺服电机; 事件管理器 B(EVB)的定时器 3、4 用于产生脉冲信号给手指的步进电机。

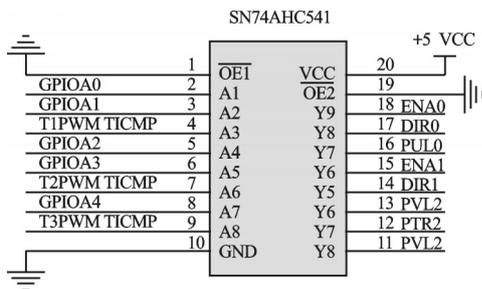
2.1.1 电平转换电路

由于 DSP 的输入/输出引脚电平都是 3.3 V, 而霍尔输入及电机脉冲信号和方向信号需要 5 V, 本研究需要设计 3.3 V 和 5 V 的电压转换电路^[11]。

把 8 路霍尔传感器的 5 V 电平转化为 DSP 可以接收的 3.3 V 电平的电路, 如图 3(a) 所示。因为霍尔元件是漏极开路的, 该电路需要上拉电阻。转换芯片 SN74AHC541 同时起到降压和缓冲的作用。



(a) 5 V-3.3 V 电压转换电路



(b) 3.3 V-5 V 电压转换电路

图 3 电压转换电路

3.3 V-5 V 电压转换电路如图 3(b) 所示。芯片左端为 DSP 输出信号为 3.3 V, 经过 SN74HCT541 转化为 5 V 后, 输出给 3 个电机的脉冲输入端和方向控制端, 其中步进电机还具有使能端。

2.1.2 传感器选择及其处理电路

假手中用到 8 个数字霍尔传感器, 其中 6 个用来判断手指弯曲的极限位置, 2 个用来判断拇指处于侧捏还是抓握状态。数字霍尔用在驱动传动机构中, 用来限定电机螺杆上螺母的运动范围, 使其在电机导螺杆的两个极限位置之间运动, 以免损伤螺杆螺纹或其他零件。该装置结构紧凑, 适合于假手这种狭小空间的应用场合。

假手在抓取物体时, 不只是通过机械位移夹取物体, 在夹取物体时力反馈也很重要。假手的力反馈由压力传感器 (FSR #400, Interlink Electronics) 来实现^[12]。传感器厚度薄、直径小, 数据处理比较简单, 适合于假肢手的场合。

力传感器采集被抓取物体的信息, 并将物体的信息传递给控制系统, 以此来优化电机控制策略。整个机械手共使用了 3 个压力传感器。电机螺母通过带动滑块上的滑轮可以使手指弯曲, 通过测量螺母和滑块之间的压力可以间接测量出电机的驱动力。

FSR 信号处理电路如图 4 所示。为了避免对被采集的模拟信号产生干扰, 调理电路的输入阻抗需要非常大。电压跟随器用于缓冲压力传感器的输入信号; RC 滤波器用于滤除高频毛刺干扰; 二极管起钳位作用, 防止模拟信号超出 0~3.3 V 范围。

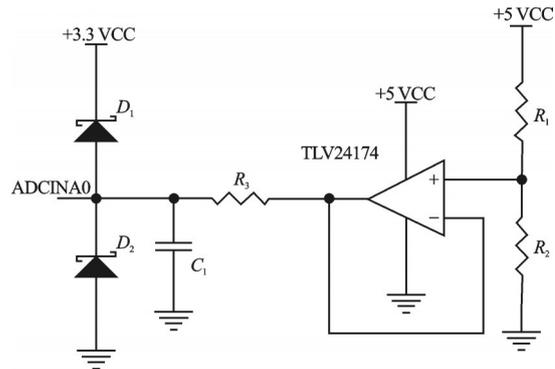


图 4 FSR 信号调理电路

经过信号处理电路后, DSP 接收到的是电压值, 所以为了得到压力的大小, 研究者必须做 FSR 的标定实验。本研究在 FSR 的受力表面上分别加各种型号的砝码。通过 Matlab 拟合得到一条对数曲线, 如图 5 所示。

曲线方程为:

$$V_{out} = 1.4976 \times \ln(F_{FSR} + 1)$$

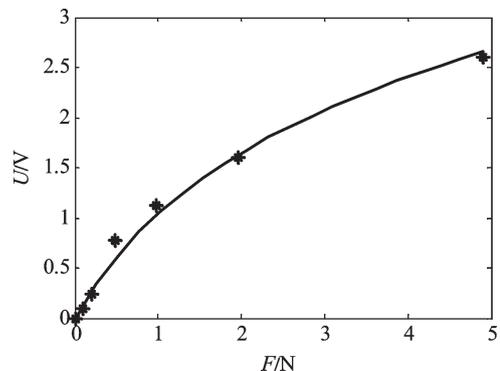


图 5 FSR 输出电压随压力的变化曲线

2.2 软件实现

电机控制方式包括位置控制、速度控制和力矩控制 3 种, 由于包络抓取最后电机的位置不确定, 本研究采用速度控制的方式来控制电机。软件实现主要涉

及EV、ADC和GPIO模块^[13-14]的应用。

本研究选用通用定时器中断事件的方法来启动ADC模块的转换。系统初始化完成后,定时器T1开始计数,等到周期中断时启动ADC转换,进入ADC中断;在ADC中断程序中,DSP将ADC转换后的数字量信息经过一些预处理得到实时的电机端驱动力状态信息。ADC采样时执行过采样算法,程序中对每个通道采样3次,3次采样平均值比单次采样精度高。同时,本研究实现了运动控制算法,控制电机速度随所测压力值的增大而减小,最后通过压力值的变化情况判定假手是否实现稳定抓握,稳定则电机停止运转。

程序流程图如图6所示。

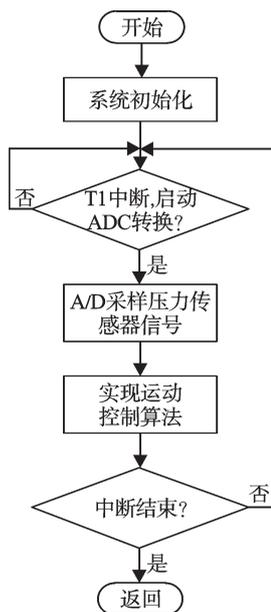


图6 控制软件流程图

3 假手的抓握实验

根据前文所述的假手控制系统的设计,笔者研制出了假手样机,并进行了以下实验:①抓取效果测试;②验证力反馈的必要性。

3.1 抓取效果测试

本研究通过基于电机输出力的反馈信号,对假手进行了柔顺控制,进行了大量的抓取物体试验。假手抓握和捏取实物实验如图7所示。该假手分别对大球、方笔筒、圆筒杯子进行包络抓取,对小球进行捏取。

试验结果表明:对于不同形状、不同材质的物体,不管是抓握还是手指捏取,该假手都能达到满意的抓握效果。

3.2 验证力反馈必要性

实验中,本研究对相同物体分别采用了有力反馈和无力反馈的两种控制模式。无力反馈时圆筒杯子抓握情况如图8所示。通过和有力反馈圆筒杯子抓握

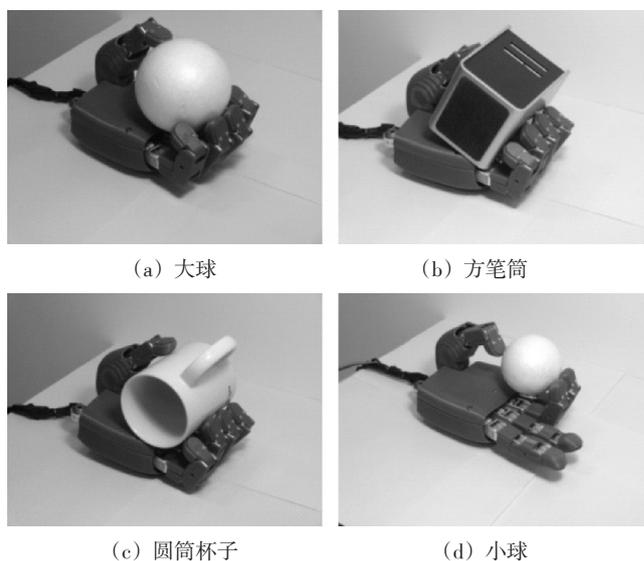


图7 假手抓握和捏取实物实验

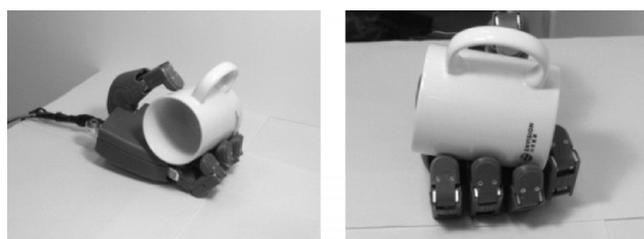


图8 假手无力反馈时抓握杯子

情况(如图7(c)所示)对比,假手在包络杯子后,由于没有力反馈信息,电机仍然拉动手指继续弯曲,手指用力过大,导致杯子滑向一侧,难以实现稳定抓取。

4 结束语

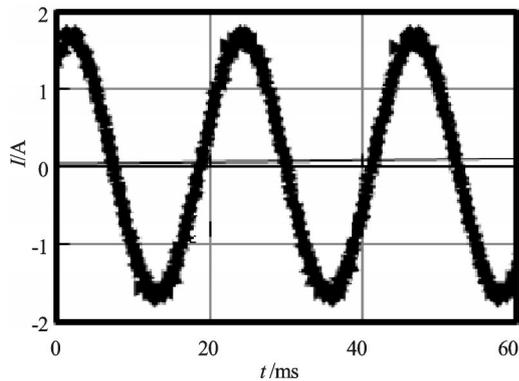
本研究介绍了欠驱动假手的机械结构,然后在该基础上提出了结构简单、开发周期短、具有力反馈的控制系统,完成了控制系统的软、硬件设计,最后,进行了抓握效果测试和验证力反馈必要性的实验。实验结果说明该欠驱动假手能够实现包络自适应抓取,基于传感器反馈的控制策略使得假手能够实现稳定抓取。

下一阶段需要在实验结果的基础上,优化控制策略,使机械手能够尽可能多地复现人手常用的各种模式,并能对这些模式给出力学性能方面的评价。

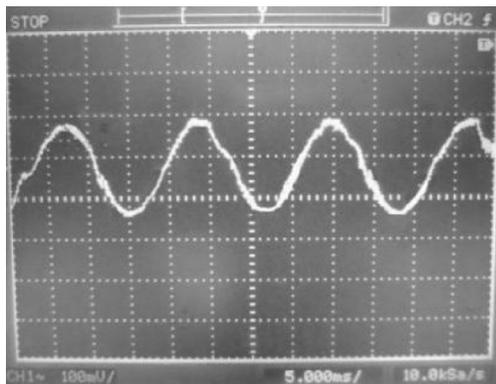
参考文献(References):

- [1] 郑修军,张 键,陈中伟,等. 肌电假手的研究现状[J]. 中国康复医学杂志,2003,18(3): 168-170.
- [2] DECHEV N,CLEGHORN W L,NAUMANN S. Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand[J]. *Mechanism and Machine Theory*,2001,36(10): 1157-1173.
- [3] CONNOLLY C. Prosthetic hands from touch bionics[J]. *Industrial Robot*,2008,35(4): 290-293.
- [4] 刘 宏,姜 力. 仿人多指灵巧手及其操作控制[M]. 北京:科学出版社,2010.

(下转第458页)



(a) 通过电流重构后的A相相电流波形



(b) 实测的A相相电流波形

图6 A相相电流波形

测母线电流并重构三相电流具有成本低、硬件简单、精度高、易实现等优点。本研究对单电阻电流采样重构三相电流技术进行了原理上的分析,并针对中、高频调制区域的非观测区域采用了预测状态观测器的数学方法。实验结果证实,该方法能够用于正确重构相电流,对于冰箱领域压缩机的控制具有很高的实际应用意义。

参考文献(References):

- [1] 陈小波,黄文新,胡育文,等. 变频器单电阻电流采样及相电流[J]. 电气传动,2010,40(8):3-6
- [2] GREEN T C, WILLIAMS B W. Derivation of motor line-current wave forms from the de-link current of an inverter[J]. *Proc. Inst. Elect. Eng.*,1989,136(4):196-203.
- [3] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. Comparison of single-sensor current control in the DC link for three-phase voltage-source PWM converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2001,48(3):491-505.
- [4] 储剑波,胡育文. 一种变频器相电流采样重构技术[J]. 电工技术学报,2010,25(1):111-117.
- [5] HARTANI K, MILOUD Y. Control strategy for three phase voltage source PWM rectifier based on the space vector modulation [J]. *Advances in Electrical and Computer Engineering*,2010,10(3):61-65.
- [6] 高 强,刘桂花. 一种永磁同步压缩机三相电流重构方法[J],电机与控制学报,2009,13(2):267-271.
- [7] 陈小波,胡育文. 基于单电阻电流采样的矢量控制算法研究[J]. 电气传动,2011,41(5):15-19
- [8] SARITHAAND B, JANAKIRAMAN P A. Sinusoidal three-phase current reconstruction and control using a DC-link current sensor and a curve-fitting observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2007,54(5):2657-2664.
- [9] LI Ying, ERTUGRUL N. An Observer-based Three-Phase Current Reconstruction using DC Link Measurement in PMAC Motors[C]//IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai:IEEE Press,2006:1-5.
- [10] CHI S, WANG X. A Current reconstruction Scheme for Low-Cost PMSM Drives using Shunt Resistors[C]//APEC 2007. Benton Harbor:[s.n.],2007:1701-1706.

[编辑:李 辉]

(上接第453页)

- [5] 熊有伦,熊蔡华. 机器人多指抓取的研究进展和展望[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2004,32:5-10.
- [6] MARIAPPAN M, JAN S M M, IFTIKHAR M. A Novel approach for classification of underactuated mechanism in myoelectric hand [J]. *American Journal of Biomedical Engineering*,2011,1(1):35-40.
- [7] PONS J L, ROCON E, CERES R, et al. The MANUS-HAND Dextrous robotics upper limb prosthesis: Mechanical and manipulation aspects [J]. *Autonomous Robots*,2004,16(2):143-163.
- [8] 林德龙. 舵机驱动仿生四足机器人设计[J]. 机械,2011,38(2):66-69.
- [9] 程卫卫,韩建海,陈 捡. 下肢行走康复训练机器人机械结构设计[J]. 机电工程技术,2011,40(9):77-79.
- [10] MASSA B, ROCCELLA S, CARROZZA M C, et al. Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand

- [C]// Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington DC:[s.n.],2002:3374-3379.
- [11] Texas Instruments Incorporated. Selecting the right level-translation solution[M]. Texas Instruments Incorporated,2004.
- [12] Interlink Electronics Incorporated. Force sensing resistor integration guide and evaluation parts catalog. [EB/OL]. [日期不详]. <http://www.interlinkelectronics.com>.
- [13] Texas Instruments Incorporated. TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide [M]. Texas Instruments Incorporated,2007.
- [14] Texas Instruments Incorporated. TMS320x281x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) reference guide [M]. Texas Instruments Incorporated,2005.

[编辑:洪炜娜]