

多自由度仿生假手嵌入式控制系统及其抓取策略

李楠, 赵京东, 姜力, 刘宏, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 为一种能够实现5指独立动作以及具备人机交互能力的多自由度仿生假手设计了手部嵌入式控制系统。该系统由传感器系统和运动控制系统构成, 集成于假手机体内部, 通过通信总线与上层控制器交换信息。传感器系统包括3种类型, 共12个传感器, 可为假手自主抓取以及人机交互中的感觉反馈提供数据, 运动控制系统用于控制、驱动各手指动作。此外, 本文以基于位置的阻抗控制为底层, 以动作预构形为上层设计了分层控制策略。实验表明, 该嵌入式控制系统和分层控制策略使假手实现了自主抓取功能, 提高了抓取的柔顺性、稳定性和适应性。

关键词: 嵌入式控制系统; 仿生假手; 预构形; 阻抗控制; 自主抓取

中图分类号: TP241.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-01-0022-06

Embedded Control System for Multi-DOF Anthropomorphic Prosthetic Hand and Its Grasping Strategy

LI Nan, ZHAO Jingdong, JIANG Li, LIU Hong, CAI Hegao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China)

Abstract: An embedded control system is designed for a kind of multi-DOF anthropomorphic prosthetic hands with five individually driven fingers and the capability of man-machine interaction. The proposed system is composed of sensory system and motion control system. They are all integrated in the body of prosthetic hand. To exchange information, the communication bus is used between the hand and the upper controller. Three kinds, a sum of 12 sensors are equipped both for automatic grasp control and for sensory feedback during man-machine interaction. The function of driving and controlling the motion of the fingers is supported by the motion control system. Furthermore, a kind of hierarchical control strategy is presented. The position based impedance control works as the low level and the feature pre-shape works as the high level. The experimental results show that, by the support of the embedded control system and the hierarchical control strategy, the prosthetic hand realizes automatic grasp, and its grasping compliance, stability and suitability are improved.

Keywords: embedded control system; anthropomorphic prosthetic hand; pre-shape; impedance control; automatic grasp

1 引言 (Introduction)

随着机器人技术、传感器技术以及生命科学的发展, 假手已经开始从仅能完成简单抓握动作的电动手爪(例如早期的商业假手 Otto Bock 手^[1])向具有多自由度和一定抓取自主性的智能假手(例如英国的 i-limb 手^[2])方向发展。而随着 Cyberhand^[3]和 Manus-hand^[4]等假手系统设计理念的提出, 具有下述特征的新型假手开始成为发展趋势:

(1) 能实现日常多种抓取模式的多自由度灵活型假手机构

(2) 近似人手的重量、大小、外观

(3) 假手内部集成复杂传感器与控制系统

(4) 自主抓取智能

(5) 具有人机交互接口 (Man-machine Interaction Interface, MII) 系统

可以看出, 具备上述5个特征的假手是对人手的高度模仿。前4个特征是从假手的本体设计出发, 研制一种机构仿生、集成度高、具有自主抓取智能的假手机电系统, 使假手能像人手一样灵活、可靠地抓取物体。而第5个特征则是为了在假手和人体之间建立一条双向信息传输通路, 一方面使残疾人能够通过残肢部分的生物信号控制假手动作; 另一方面将假手自身传感器系统收集、处理的本体和外部信息通过感觉反馈传递给人体^[5], 从而在控制结构上形成了由假手自主控制闭环和人体—假手控制闭环^[6]构成的双闭环控制结构, 有利于提高假手的

抓取成功率^[7]. 这也使假手具备了较完整的接近人手的功能.

目前, 同时具备上述5种特征的先进假手在全世界仍处于研制阶段. 2007年投入市场的i-limb手刚刚使商业假手实现了大小、重量、外观的拟人化, 手掌内集成了简单的传感器和控制系统, 可实现握紧、张开、捏取等动作. 意大利的Smart-hand^[8-9]实现了假手内部集成运动控制系统和复杂传感器系统, 而自主抓取智能和MII系统尚处研发中. 日本东京大学的腱驱动假手^[10]采用表面电刺激方式实现假手的触觉反馈^[11], 但该假手系统并未实现集成化, 控制系统分散、庞大.

因此, 哈尔滨工业大学以研制一种兼顾灵活性、仿生性、集成度和抓取智能, 并带有MII系统的感知型仿生假手HIT IV hand为目标展开了研究. 本文着重对该假手的机体结构、嵌入式控制系统以及基于阻抗控制^[12]和动作预构形^[13]的分层自主抓取策略进行了论述. 通过抓取实验证明了该策略的抓取效果, 并在实验部分的最后讨论了一种梯次抓取方法, 用以实现人体对假手握紧力度的控制.

2 机体设计 (Mechanical design)

HIT IV hand假手具有与人手一样的外形, 体积约为正常人手的85%, 由手掌盖板、手背盖板、5根手指以及手腕组成. 该手由5个直流有刷伺服电机驱动, 全部电机、传感器系统和运动控制系统集成于手掌内部, 总重量约420 g, 如图1所示.

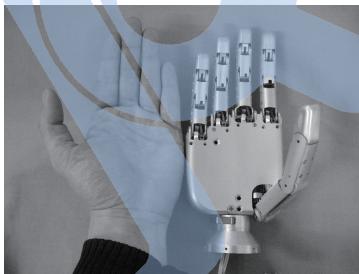


图1 HIT IV hand与人手对比

Fig.1 Comparison of the man hand and HIT IV hand

该手每根手指都是由指尖、中指节、近指节组成的, 内部采用四连杆耦合机构传动, 一个直流电机驱动一根手指, 使各手指既可单独运动, 又可相互协调动作, 增强了手指的灵活性和对抓取物的适应性. 在电机的驱动下, 每根手指的3根指节分别绕远关节、中关节以及基关节转动. 这样HIT IV hand就具有了5个自由度和多达15个转动关节. 与固定指形的假手相比, 这种设计不仅可以增强假手的抓握性能, 还可以更好地模拟人手抓握时的动作. HIT

IV hand抓取不同外形物体时的效果如图2所示.

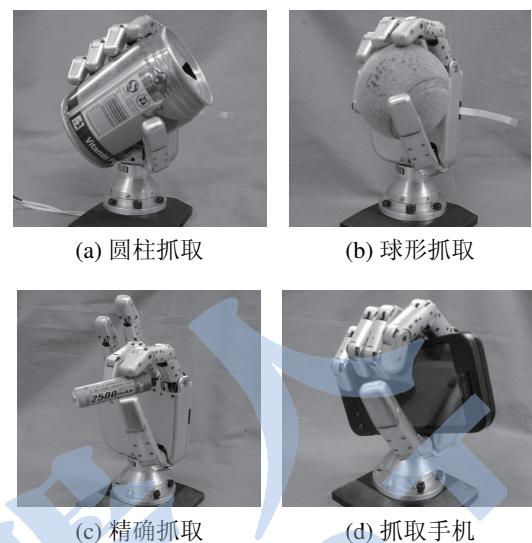


图2 HIT IV hand对不同外形物体的抓取

Fig.2 HIT IV hand grasping objects with different shapes

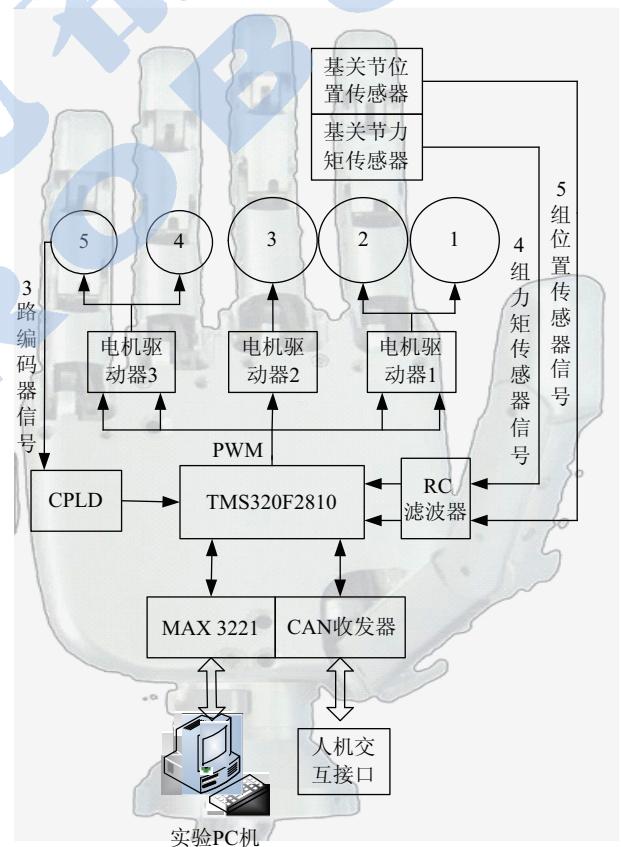


图3 嵌入式控制系统结构

Fig.3 Structure of the embedded control system

3 嵌入式控制系统 (Embedded control system)

整套HIT IV hand控制系统由传感器系统、运动控制系统和MII系统组成. 目前, 该假手的MII系统采用人体表面肌电信号作为控制源, 通过电刺

激方式实现感觉反馈。运动控制系统与传感器系统均集成在假手机体内部，构成手部嵌入式控制系统。这样配置不仅提高了系统集成度，使假手本体成为一个独立模块，便于调试、维护、穿戴，而且就近布置处理电路可以缩短传感器信号的传输距离，有利于提高信号质量，减少传输干扰。嵌入式控制系统框图如图 3 所示。下文分别详述该嵌入式系统的各子系统。

3.1 传感器系统

传感器系统是 HIT IV hand 用于获取假手内部和外部信息的感知系统。一方面，它要作为自主抓取控制中各个控制闭环的反馈环节，向控制器提供信息。另一方面，还要为人体—假手控制闭环中的感觉反馈环节提供数据。因此，传感器性能的高低、数量的多少和种类的丰富程度将影响假手的抓取性能、智能以及感觉反馈的准确度。

目前，HIT IV hand 本体内部集成了 3 种共 12 个传感器，从而使其具备了较高的感知能力。除小指外的各手指内均集成有一套位置和力矩传感器，小指内仅集成有一套位置传感器。另外，拇指、食指、中指 3 根手指带有电机编码器，用于测量电机的转速和转向，构成速度闭环。

1 维应变式力矩传感器用于测量手指基关节处的力矩。应变片布置在伞齿轮与基关节轴之间的驱动连杆上。抓取物体时，驱动连杆发生弹性变形导致应变片电阻值发生变化，再通过电桥检测电阻分压值的变化，实现对基关节力矩的测量。

基关节转动角度通过巨磁阻 (giant magneto resistance, GMR) 式绝对位置传感器测量。该传感器的敏感元件电路板安装在基关节内电机轴上方，通过检测固定在电机轴端的磁钢的旋转磁场来测量电机轴的转动角度。再经过减速比的折算即可求得基关节的转动角度。两种传感器及其布置位置如图 4 所示。

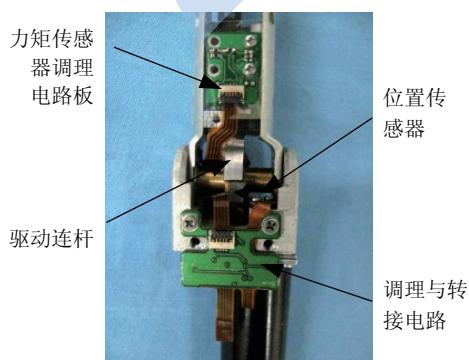


图 4 基关节力矩和位置传感器

Fig.4 Torque and position sensors on base joint

3.2 运动控制系统

运动控制系统的任务有：1) 接受 MII 系统的控制编码，预构形规划后驱动 5 个手指动作。2) 传感器信息采集、汇总、处理，向 MII 系统传递传感器信息。3) 根据获得的传感器信息进行假手本体的闭环控制，完成自主抓取。4) 具备与 PC 机之间的通信能力，用于完成假手本体测试。由上述各项任务可以看出，该系统的处理核心既要有多路 AD 采集通道、通信通道以及电机驱动通道，又要具有较强的运算处理能力。因此，本文采用 DSP 芯片 TMS320F2810 作为该系统的处理核心，并配以 CPLD 芯片 EPM7064 作为协处理芯片用于电机编码器信号的处理。另外，采用直流电机驱动芯片 MPC17531 完成对 PWM 控制信号的功率放大。

TMS320F2810 是一种 32 位定点处理器，工作频率达到 150 MHz，并且拥有丰富的外围设备，包括：两路串行通讯接口 (SCI) 模块，一路区域网络控制器 (CAN)，一路串行外围接口 (SPI) 模块，16 通道 12 位 A/D 转换器，12 路 PWM 通道以及 3 路外部中断通道。其中，14 个 A/D 转换通道用于采集 5 个位置传感器和 4 个力矩传感器的信号，通过 CAN 总线与 MII 系统通讯，通过由一路 SCI 扩展的 RS232 总线与 PC 机通信，通过 5 组 PWM 信号经 3 片直流电机驱动芯片控制 5 个电机转动。CPLD 用于对电机编码器信号进行倍频和判向处理，并将处理后的信息传递给 DSP。嵌入式控制系统在假手机体内的集成效果如图 5 所示。

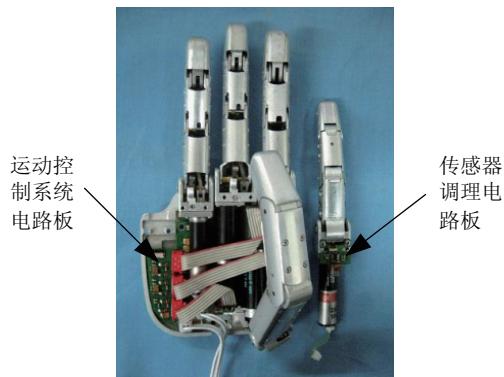


图 5 嵌入式控制系统在 HIT IV hand 机体中的集成效果

Fig.5 Effect of the embedded control system integrated in the body of HIT IV hand

4 控制策略及控制器设计 (Design of control strategy and controller)

4.1 控制策略

HIT IV hand 的抓取过程可实现自主控制。自主抓取的实现不仅能减轻使用者的操作负担，降低操

作疲劳, 还能提高抓取的成功率、适应性和稳定性。抓取过程采用分层控制策略, 上层控制采用动作预构形方式, 底层控制采用基于位置的阻抗控制。本文的 MII 系统可识别 10 种手部动作模式^[14], 并对其进行编码, 如图 6 所示。这 10 种动作及其编码由左至右分别为放松 0、拇指弯曲 1、拇指伸展 2、食指弯曲 3、食指伸展 4、三指弯曲 5、三指伸展 6、全握 7、全伸展 8、捏取 9。然后, 将动作编码经 CAN 总线传递给运动控制系统, 依据与编码对应的预构手形进行动作规划, 得到各个手指的目标位置、保护力矩等预设参数。

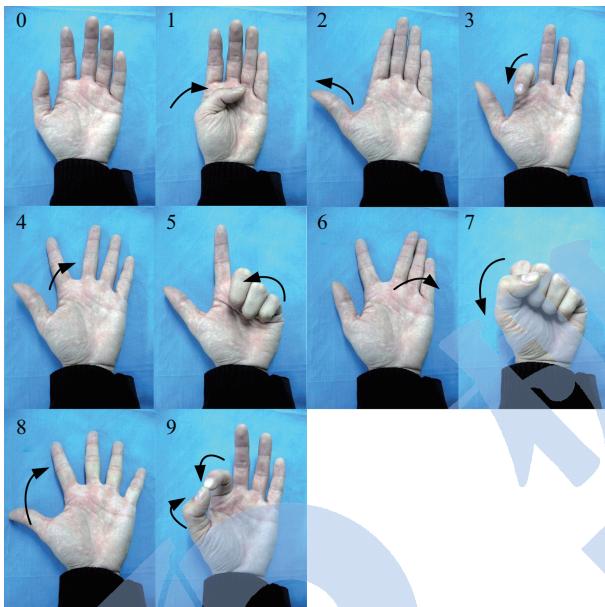


图 6 10 种手部动作模式及其模式码
Fig.6 10 hand features and the mode codes

在对各手指的运动控制中采用了基于位置的阻抗控制策略, 可同时实现在自由空间的位置控制和约束空间的力矩控制。由于该阻抗控制策略可以将反馈的力矩信号转换为位置修正量, 使手指像弹簧一样工作, 因而降低了假手抓取物体的瞬时接触力, 使抓取更加柔顺。控制流程如图 7 所示。下一小节将具体介绍该阻抗控制方法的实现过程。

4.2 控制器设计

基于位置的阻抗控制方法是以位置控制环作为内环, 力矩环作为外环, 把力矩传感器反馈信号转换为位置和速度的修正量来实现的。控制框图如图 8 所示。

其中位置控制环使用增量式 PID 控制器, 直流电机通过 PWM 方式控制。绝对位置传感器向 PID 控制器返回电机实际转动位置 θ 。控制位置 θ_c 与实际转动位置 θ 相减得到位置偏差量 $\Delta\theta$ 。根据方程:

$$\Delta U_n = K_{eq} [K_p (\Delta\theta_n - \Delta\theta_{n-1}) + K_i \Delta\theta_n + K_d (\Delta\theta_n - 2\Delta\theta_{n-1} + \Delta\theta_{n-2})] \quad (1)$$

$$U_n = U_{n-1} + \Delta U_n \quad (2)$$

可得输出量 U_n 。其中 $\Delta\theta_n$ 、 $\Delta\theta_{n-1}$ 、 $\Delta\theta_{n-2}$ 分别为第 n 、 $n-1$ 、 $n-2$ 个采样时刻的位置偏差值, ΔU_n 为第 n 个采样时刻的输出量增量值, U_{n-1} 为第 $n-1$ 个采样时刻的输出量, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数, K_{eq} 为折算比例系数。

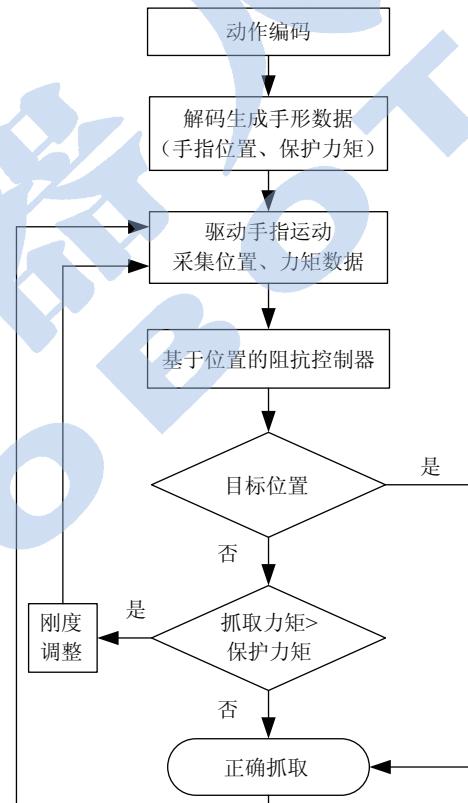


图 7 控制流程
Fig.7 Control flowchart

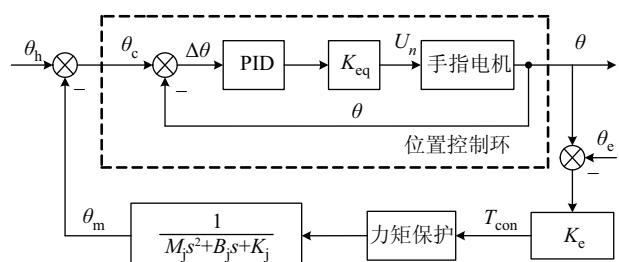


图 8 基于位置的阻抗控制
Fig.8 Block diagram of the position based impedance control

力矩环中, 力矩传感器测量值 T_{con} 通过阻抗滤波器产生一个位置修正量 θ_m :

$$\theta_m(s) = \frac{T(s)}{M_js^2 + B_js + K_j} \quad (3)$$

式中 M_j 是目标惯量, B_j 是目标阻尼, K_j 是目标刚度. 位置修正量 θ_m 与期望位置 θ_h 相减得到控制位置 θ_c 作为位置控制器的输入.

5 实验与分析 (Experiment and analysis)

为了检验 HIT IV hand 的阻抗控制器以及自主抓取效果, 本文分别设计了单指阻抗控制实验和多指自主抓取实验. 将实验 PC 控制系统与假手通过串口连接, 通过 PC 机上的控制界面向假手发出动作命令, 实验系统如图 9 所示.

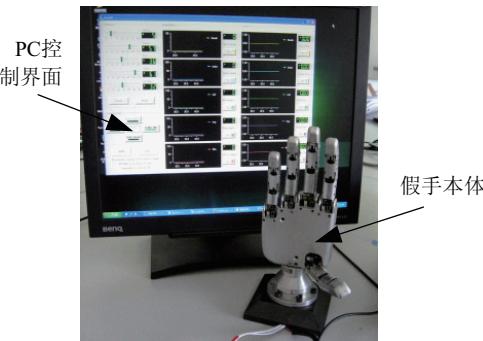


图 9 实验平台

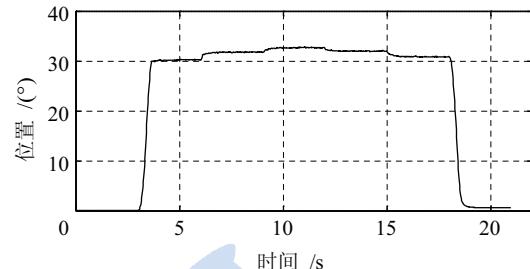
Fig.9 Experiment system

实验 1: 单指阻抗控制实验. 本文以中指为例测试阻抗控制效果. 中指按基关节旋转 $0^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 40^\circ \rightarrow 50^\circ \rightarrow 40^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 0^\circ$ 的顺序运动. 在运动到 30° 时, 开始碰触到铁质物体, 力矩传感器检测到由接触力引起的基关节力矩变化. 由于铁质障碍物的阻挡, 手指无法运动到目标位置, 如图 10(a) 所示, 力矩随着目标位置的梯次变化而变化, 如图 10(b) 所示. 由于采取了阻抗控制策略, 碰触时没有产生冲击力矩, 接触过程较为柔顺.

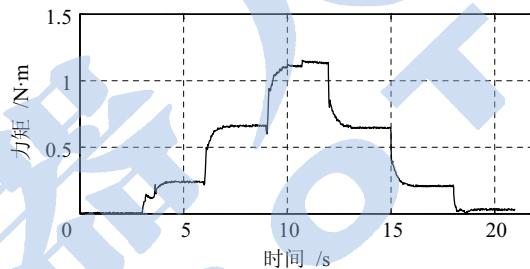
实验 2: 多指自主抓取实验. 在多指抓取实验中, 将进行假手抓握弹性圆柱体的实验. 由 PC 机控制界面发出“全握”动作码“7”, 假手接到动作码后, 根据“全握”的预构形数据控制假手 5 个手指渐进握紧. 然后, 接到“全伸展”动作码“8”后松开. 即食指、中指、无名指和小指按基关节旋转 $0^\circ \rightarrow 40^\circ \rightarrow 50^\circ \rightarrow 60^\circ \rightarrow 70^\circ \rightarrow 0^\circ$ 的顺序抓握, 拇指按基关节旋转 $0^\circ \rightarrow 15^\circ \rightarrow 21^\circ \rightarrow 27^\circ \rightarrow 33^\circ \rightarrow 0^\circ$ 的顺序动作. 图 11 是各手指在抓过程中的位置传感器和力矩传感器数据.

从图 11 可以看出, 拇指和食指最先碰触到抓取物, 然后中指和无名指相继与抓取物接触, 小指在从 $60^\circ \rightarrow 70^\circ$ 的运动过程中最后与抓取物接触. 在逐级握紧过程中, 抓取物发生形变, 力矩梯次增强. 由于采用了阻抗控制与动作预构形相结合的分层控制策略, 在自主抓取过程中, 实现了从自由空间到

约束空间的柔顺过渡, 减小了冲击, 使抓取过程更稳定.

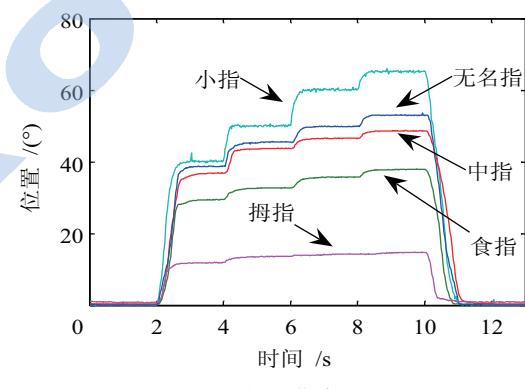


(a) 位置曲线

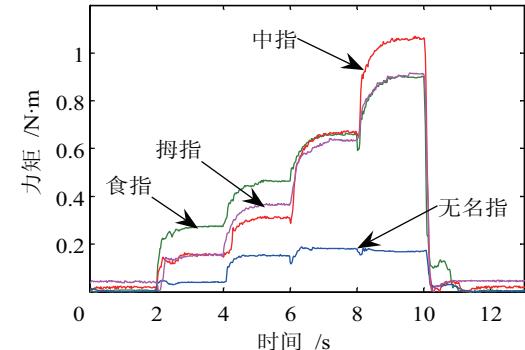


(b) 力矩曲线

图 10 中指阻抗控制曲线
Fig.10 Curves of impedance control of middle finger



(a) 位置曲线



(b) 力矩曲线

图 11 多指抓取实验曲线
Fig.11 Curves of multi-finger grasping experiment

另外, 本实验中采用了渐进的梯次握紧方式抓取物体, 其目的在于产生具有一定梯度的力矩信号.

将该梯度力矩信号与 HIT IV hand 的 MII 系统的感觉反馈刺激等级相对应, 既可使人体感觉到假手的握紧程度, 又可以使人按握力等级控制假手的握力, 从而使人能像控制人手那样控制假手的抓握力度, 实现较高的仿生化控制。在 HIT IV hand 今后的研究中将进一步探讨和验证该控制方式。

6 结论 (Conclusion)

本文设计了一种由传感器系统和运动控制系统构成的嵌入式控制系统。该系统集成于 HIT IV hand 假手的手掌及手指内部, 以 DSP 为控制处理核心, 实现了闭环运动控制、传感器数据采集、处理和传递。另外, 本文采取分层控制策略, 首先将手部动作进行了预构形规划, 然后通过基于位置的阻抗控制器完成手指的运动控制。实验表明, 该控制策略降低了假手抓取物体时的冲击力, 提高了抓取的柔顺性、可靠性和适应性, 实现了自主抓取, 令使用者可以更轻松、便捷地操作假手。

参考文献 (References)

- [1] Otto Bock Healthcare GmbH. MYOBOCK-Armprothesen [DB/OL]. [2010-04-08]. <http://www.ottobock.com>.
- [2] Touch Bionics Inc. i-LIMB hand brochure[DB/OL]. [2010-04-08]. <http://www.touchBionics.com>.
- [3] Carrozza M C, Cappiello G, Micera S, et al. Design of a cybernetic hand for perception and action[J]. Biological Cybernetics, 2006, 95(6): 629-644.
- [4] Pons J L, Rocon E, Ceres R, et al. The MANUS-HAND dexterous robotics upper limb prosthesis: Mechanical and manipulation aspects[J]. Autonomous Robots, 2004, 16(2): 143-163.
- [5] Yoshida M, Sasaki Y. Sensory feedback system for prosthetic hand by using interferential current[C]//Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 1431-1432.
- [6] 汤奇荣, 姜力, 李楠, 等. 肌电假手感觉反馈机理研究 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27(8): 72-74,83.
- Tang Qirong, Jiang Li, Li Nan, et al. Mechanism research of sensory feedback for prosthetic hand[J]. Transducer and Mi-
- crosystem Technology, 2008, 27(8): 72-74,83.
- [7] Cipriani C, Zaccone F, Micera S, et al. On the shared control of an EMG-controlled prosthetic hand: Analysis of user-prosthesis interaction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(1): 170-184.
- [8] Cipriani C, Controzzi M, Vecchi F, et al. Embedded hardware architecture based on microcontrollers for the action and perception of a transradial prosthesis[C]//IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 848-853.
- [9] Cipriani C, Controzzi M, Carrozza M C. Progress towards the development of the SmartHand transradial prosthesis[C]//IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 682-687.
- [10] Arieta A H, Katoh R, Yokoi H, et al. Development of a multi-DOF electromyography prosthetic system using the adaptive joint mechanism[J]. Applied Bionics and Bio-mechanics, 2006, 3(2): 101-111.
- [11] Kato R, Yokoi H, Hernandez A, et al. Mutual adaptation among man and machine by using f-MRI analysis[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(2): 161-166.
- [12] Zhao D W, Jin M H, Jiang L, et al. Development of an underactuated prosthetic hand with the step motor[J]. High Technology Letters, 2006, 12(4): 341-345.
- [13] Cipriani C, Zaccone F, Stellin G, et al. Closed-loop controller for a bio-inspired multi-fingered underactuated prosthesis[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 2111-2116.
- [14] 杨大鹏, 赵京东, 姜力, 等. 一种 3 自由度仿人型假手的肌电控制 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(1): 5-9. Yang Dapeng, Zhao Jingdong, Jiang Li, et al. EMG control of a 3-DOF anthropomorphic prosthetic hand[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(1): 5-9.

作者简介:

- 李 楠 (1982-), 男, 博士生。研究领域: 生物机电一体化技术, 机器人技术。
赵京东 (1977-), 男, 副教授, 硕士生导师。研究领域: 生物机电一体化技术, 机器人技术。
姜 力 (1970-), 男, 教授, 博士生导师。研究领域: 生物机电一体化技术, 机器人技术。

(上接第 21 页)

- [10] 吴剑威, 史士财, 刘宏. 自由飘浮空间机器人笛卡尔避奇异运动规划 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 5-8,17.
- Wu Jianwei, Shi Shicai, Liu Hong. Cartesian singularity-avoiding path planning for free-floating space robot[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(11): 5-8,17.
- [11] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Boston, MA, USA: Addison-Wesley,

1989.

作者简介:

- 吴剑威 (1981-), 男, 博士生。研究领域: 空间机器人技术。
史士财 (1978-), 男, 博士, 讲师。研究领域: 空间机器人技术。
刘 宏 (1966-), 男, 博士, 长江学者特聘教授。研究领域: 空间机器人技术, 多指灵巧手。