

文章编号: 1002-0446(2005)01-0020-06

多用途欠驱动手爪的自主抓取研究

骆敏舟^{1,2}, 梅涛¹, 卢朝洪¹

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学信息学院自动化系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 对欠驱动手爪自主抓取进行了研究, 将其分为自主决策和抓取控制两个过程. 首先分析了欠驱动手爪的特点、主要的抓取模式, 并借鉴人的抓取经验, 采用模糊输入方法, 综合考虑抓取任务要求和物体本身的特征属性, 利用模糊神经网络良好的分类特性选择合适的抓取模式. 在此基础上, 完成手指姿势调整, 采用基于传感器反馈的控制策略, 在被抓物体上形成的合适的力分布以获得稳定抓取, 并通过抓取实例验证了抓取决策和控制的正确性, 提高了欠驱动手爪抓取的自动化水平.

关键词: 机器人; 欠驱动手爪; 自主抓取; 模糊神经网络

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Research on Autonomous Grasp for the Versatile Underactuated Robot Hand

LUO Min-zhou^{1,2}, MEI Tao¹, LU Chao-hong¹

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The novel underactuated robot hand can achieve versatile grasp modes with the ingenious mechanism. This paper focuses on the problem of autonomous grasp of the underactuated robot hand, and divides the problem into two processes: autonomous decision and grasp control. Firstly, the characteristics and grasp modes of the underactuated robot hand are presented. Secondly, proper maps between the fuzzy inputs, including grasp task and object features, and the outputs of grasp modes are established using a fuzzy neural network. According to the grasp modes, the finger orientations are regulated. The control tact based on force sensor feedback is proposed to impose proper forces on all phalanges to achieve stable grasp. At last grasp experiments validate the correctness of autonomous decision and control.

Keywords: robot; underactuated robot hand; autonomous grasp; fuzzy neural network

1 引言 (Introduction)

自主抓取是根据物体特点和抓取任务要求, 自主决定抓取模式并完成抓取过程. 机器人末端夹持器要做到自主抓取必须具备两个先决条件: 一要有具备多种抓取模式、抓取稳定的机器人末端夹持器; 二要能够利用人的抓取经验进行自主抓取决策.

近几十年来, 国内外已经研制出各种类型的机器人末端夹持器. 这些末端夹持器分为专用^[1]和通用^[2,3]两大类. 专用夹持器制造简单, 易于控制, 抓取力较大, 但只针对特定对象而设计, 缺乏通用性, 因此, 几乎不涉及抓取的决策问题. 通用夹持器中研究比较多的是多指灵巧手, 这类手指的每个关节需要

驱动, 导致驱动元件多, 控制策略复杂, 抓取力比较小, 抓取的可靠性和稳定性相对较差, 抓取任意形状物体时决策失败的可能性较大.

2 欠驱动手爪特点 (Features of the underactuated robot hand)

根据欠驱动原理, 加拿大 MD ROBOTICS 公司和 Laval 大学合作研制出多用途机器人末端夹持器: 欠驱动手爪 SARAH (Self-Adapting Robotic Auxiliary Hand)^[4,5]. 欠驱动手爪具有多种抓取模式, 可以抓取任意形状的物体, 同时又具有控制方便、出力大的优点. 包括手指位置旋转自由度在内, 该手爪共有十个

自由度,用两个电机驱动,一个电机负责手指开合,另一个负责调整位置.既可以用末关节指面捏取的方式完成精确抓取,又可以用欠驱动的方式完成包络抓取.依靠被动柔顺,欠驱动手指对被抓取物体具有形状自适应的功能.

为了研究欠驱动手爪的抓取,我们研制了基于锥齿轮差动的欠驱动手爪(图 1),它集成了 SARAH 手爪的灵巧手指机构,采用两级锥齿轮差动方式,机构简洁高效,结构紧凑,维护方便,并且对手指方向调整机构作了进一步的改进,采用步进电机的调节方式实现连续调整,具备更多的抓取模式;研制了基于 PVDF 压电材料的接触力传感器和接近觉传感器安装于手指关节指面和末关节,检测手指的抓持力大小和物体的位置,便于抓取控制.

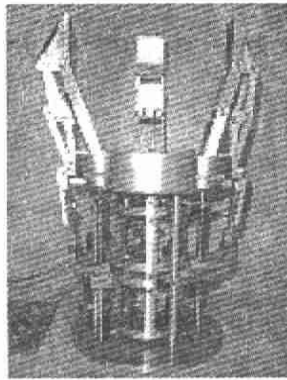


图 1 基于锥齿轮差动机构的欠驱动手爪
Fig. 1 Underactuated robot hand based on cone gear differential mechanism

欠驱动手爪在每个手指上都集成两套机构:形状自适应手指机构和并行精确抓取机构.其中形状自适应欠驱动手指机构主要实现以欠驱动方式完成包络抓取.

在包络抓取物体时,每个关节指面按照顺序依次被约束以后,各关节指面的接触力取决于外部的约束和手指的构形,如图 2 所示.由于手指只能压不能拉,所以 3 个法向接触力 $F_1 > 0$ 、 $F_2 > 0$ 、 $F_3 > 0$,根据虚功原理^[6]有:

$$\delta W = \sum_i^n F_i \delta r_i = 0$$

$$d_1 \theta_1 F_1 + d_2 \theta_2 F_2 + n \theta_1 F_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_6 - \pi) + d_3 \theta_3 F_3 + m \theta_2 F_3 \cos(\varphi_1 + \alpha_1 - \varphi_2 - \pi) + n \theta_1 F_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_6 - \pi) + \delta_s F_s = 0 \quad (1)$$

其中 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 δ_s 是虚位移.由式(1)可以看出,3 个接触力取决于接触点的位置、角度等外部约束以及

关节连杆的尺寸,并且 3 个接触力之间相互耦合,输入和输出之间呈现高度的非线性关系.因此,在欠驱动包络抓取模式下,我们无法对每个关节实现精确的力控制,这一点和灵巧手存在很大区别.其稳定抓取的条件是形封闭,靠限制物体全部或部分自由度实现稳定抓取.

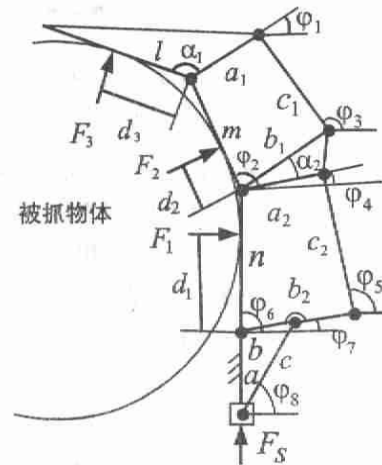


图 2 形状自适应欠驱动手指机构
Fig. 2 The shape self-adapting underactuated finger

并行精确抓取机构像人手一样用末关节指面捏取的方式完成各种精确抓取,如图 3 所示.

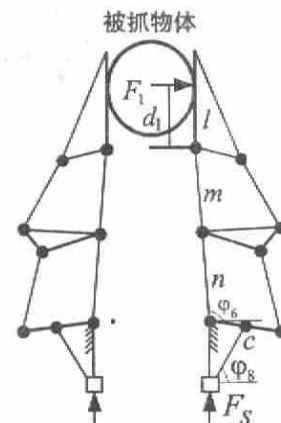


图 3 并行精确抓取机构
Fig. 3 The parallel precision grasp mechanism

不考虑摩擦,根据力矩平衡原理得到:

$$F_1 = c F_s \cos \varphi_8 / ((m + n) \sin \varphi_6 + d_1) \quad (2)$$

由式(2)可见,在精确抓取模式下,每个手指的输入和输出之间有确切的关系,可以实现精确的力控制,因此稳定抓取的条件是力封闭,即依靠两个或三个合作手指的接触点摩擦锥的作用来实现稳定抓取.当抓取不同的物体时,欠驱动手爪依靠两个平行四边形机构和弹簧在包络抓取和精确抓取之间进行自动切换^[5],如图 4 所示.

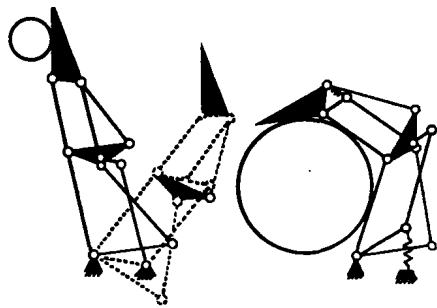


图4 包络抓取和精确抓取方式之间的切换

Fig.4 Switching between enveloping and precision grasp

在手指方向调整机构的作用下,利用步进电机对两个手指相向联动调节可以实现更多的抓取模式(图5).当手指在初始对心位置(最粗线条表示),可以实现包络对心抓取和精确对心捏取.当右边手指顺时针转动(左边手指逆时针)60°时变成三指平行(最细线条表示),可以实现三指包络和三指精确捏取.当逆时针转动30°时(中粗线条表示),其中两个手指处于平行位置,另外一个手指不参与抓取,可以实现两指精确对捏和包络抓取.

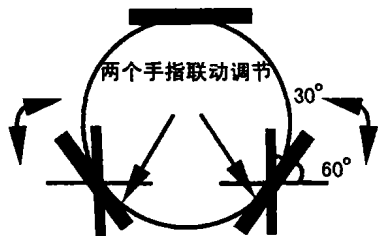


图5 欠驱动手爪调整手指位置形成多种抓取模式

Fig.5 Finger location regulation of the underactuated robot hand for versatile grasp modes

通过上面的分析,我们可以得到欠驱动手爪四种主要的抓取模式如图6所示.

精确平行是采用两指或三指平行捏物体,当物体长度大于指宽时,采用三指对捏,否则用两指,如图6中的(a)、(b)所示;精确对心是采用三个对称手指捏取物体,图(c)所示;包络平行是采用三指平行环抱包络物体,图(d)所示;包络对心是采用三指对称包络物体,图(e)所示.

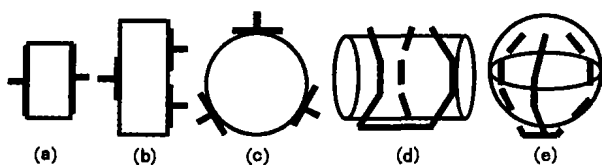


图6 欠驱动手爪的主要抓取模式

Fig.6 Main grasp modes of the underactuated robot hand

3 自主抓取流程 (Processes of autonomous grasp)

根据欠驱动手爪的工作机理,得到自主抓取流程(如图7所示),主要包括抓取自主决策和抓取控制两大模块.在决策模块中,综合了抓取任务和物体本身的特征属性作为决策的依据,并且对特征属性采用模糊的表达方式更加符合人在抓取时的思维习惯,利用模糊神经网络进行决策,选择合适的抓取模式,输出抓取模式到控制模块.控制模块首先按照选择的抓取模式完成手指位置的调整,采用基于多传感器反馈的混合控制策略,由力矩电机驱动手指关节在物体上形成正确的力分布,完成初步的抓取.然后对抓取是否满足抓取任务的要求进行评判,如果满足抓取任务的要求,则抓取成功,如果不满足则重新输入进行决策,直到满足要求为止.由此可见,抓取决策是整个自主抓取是否成功的关键.

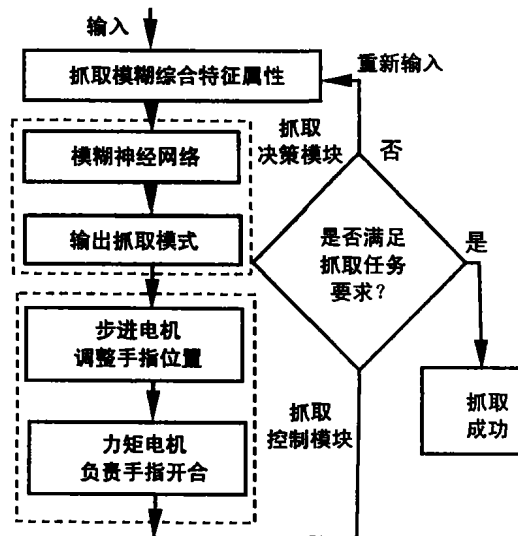


图7 欠驱动手爪自主抓取控制流程

Fig.7 Flow chart of autonomous grasp of the underactuated robot hand

4 抓取决策 (Grasp decision)

欠驱动手爪的抓取决策过程就是利用模糊神经网络良好的分类特性,完成从特征属性空间到抓取模式空间的非线性映射.

4.1 决策的特征属性

这里我们根据人的抓取经验,对一个任意形状物体的特征属性进行模糊评判,将物体本身的特征用三个属性来描述:形状、体积和重量.物体的形状分为细长、中等和扁平.细长就是在某一个方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸都要大得多,并且另外两个尺寸接近.中等就是三个方向的尺寸都比较

接近. 扁平就是其中一个方向上的尺寸远远小于另外两个, 并且另外两个接近. 假设手指的宽度为 r_0 , 将物体长、宽和高的最小尺寸 r_0 相比较, 得到体积的三个分类: 较大、中等和较小. 同样将物体的重量和手爪能抓取的最大重量 g_0 相比较, 得到重量的三个分类: 较大、中等和较小. 对于抓取任务, 用可操作性和稳定性这两个最重要的属性来表征, 也将它们分为三类: 较差、中等和较好. 一般来说, 在同一种抓取模式下, 有摩擦的精确抓取或无摩擦的包络抓取, 手指和物体的接触点越多则稳定性越好. 可操作性则正好相反.

4.2 决策规则的抽取

通过抓取试验, 我们得到 140 个试验数据样本, 随即抽取其中 120 个作为训练样板, 另外 20 个作为检测样本. 首先需要对这 120 个训练样板进行模糊聚类. 由于聚类时采用相似度量的方法, 对每个样本数据的值域非常敏感, 因此, 需要将输入变量进行归一化处理.

本文采用减法聚类法^[7]对 120 个样本进行模糊聚类, 减法聚类的中心点为已有的数据点. 减法聚类应用于输入和输出数据集时, 每个中心代表一个抓取知识的原型, 辨识出第 i 个聚类中心, 就得到了第 i 条规则, 并且当中心和规则确定以后, 这些聚类中心可以合理地用于 Sugeno 型 0 阶推理系统中模糊规则, 这样可以获得较高的模型精度. 再经过归并和抽取得到一个抓取知识系统如表 1, 表 1 的论域 U 中每一个对象表示 1 条规则.

表 1 欠驱动手爪抓取规则

Table 1 Grasp rules for underactuated robot hand

论域	条件属性					决策属性	
	抓取任务属性		物体特性属性			抓取模式	
对象	可操作性	稳定性	形状特征	体积	重量	抓取方式	手指位置
1	较好	一般	细长	较大	较大	包络	平行
2	一般	一般	扁平	中等	中等	精确	平行
3	较差	一般	中等	中等	较小	精确	对心
4	一般	较差	细长	较小	较小	精确	平行
5	较差	一般	中等	较大	较小	包络	对心
6	较差	较好	中等	中等	较小	包络	对心
7	一般	一般	扁平	较大	中等	包络	对心
8	一般	较差	细长	较小	较大	精确	平行
9	一般	一般	细长	较大	较大	精确	对心
10	一般	较好	扁平	中等	中等	包络	对心

4.3 模糊神经网络的结构和学习算法

径向基神经网络是在借鉴生物局部调节和交叠接收区域知识的基础上, 提出的一种采用局部接收域来执行函数映射的人工神经网络, 实质是非监督的聚类方法和有监督的线性单层感知器方法的组合. 可以证明在满足五个条件时, RBF 神经网络实际上就是一种模糊推理系统 FIS, 并且由于 RBF 网络的模型的拓扑结构分为输入层、隐含层(径向基层)和线性输出层, 它将普通的模糊神经网络的输入层和模糊化层的功能在径向基层加以同时实现, 因此网络层数减少, 容易实现, 适合模式分类问题. RBF 与模糊推理系统 FIS 等价的条件^[8]为:

- (1) 接受单元数等于 IF-THEN 模糊规则数.
- (2) 每个 IF-THEN 的模糊规则的输出是一个常值.
- (3) 每个规则的隶属度函数都选择与高斯函数具有相同的格式.
- (4) 计算每个规则的启动强度 T-norm 算子是乘积.
- (5) RBF 和模糊推理系统使用相同的方法推导输出.

抓取模式选择的 RBF 模糊神经网络结构如图 8, 一共有 3 层, 5 个输入和 1 个输出. 5 个输入分别表示抓取任务的可靠性、灵巧性、形状特征、体积和重量; 输出用模糊单值 {0, 1, 2, 3} 分别表示 {包络对心、包络平行、精确对心、精确平行} 四种抓取模式. 网络结构的隐层接收单元数等于规则数.

模糊推理的 Sugeno 型模糊推理 0 阶系统来进行抓取方案的模糊推理, 第 i 个推理规则如下:

Rule: IF x_1 is A_{1i} and x_2 is A_{2i} and x_3 is A_{3i}
and x_4 is A_{4i} and x_5 is A_{5i}

THEN y is y_i

第 i 个隐层节点的输出为:

$$R_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

(3)

其中向量 x 是 m 维输入, c_i 是与 x 具有相同维数的第 i 个基函数的中心, σ 是该函数围绕中心点的宽度, m 是接收单元的个数, 这里等于抓取的规则数, $\|x - c_i\|$ 表示向量 $x - c_i$ 的范数, 表示两个向量之间的广义距离. 当 $\|x - c_i\|$ 增大时, $R_i(x)$ 迅速衰减为 0. 只有靠近 c_i 附近的 x 被激活. y_i 表示手爪的四种主要抓取模式. 为了运算简便, 规则的启动强度可以按照前件隶属度函数的 T-norm 获得, 等于向量 x 在 c_i 处的隶属度函数的乘积:

$$R_i(x_1, x_2, \dots, x_5) = \mu_{A_{i1}}(x_1) \mu_{A_{i2}}(x_2) \dots \mu_{A_{i5}}(x_5)$$

图8为所采用的模糊神经网络结构,共分为3层网络结构,第一层用于输入模糊的值,是模糊化层,这里的神经元是用径向基函数为激发函数的,显然,径向基层就完成了相当于模糊逻辑中的输入层和中间层的功能,当输入层有精确信号输入,则在第一层就可以在径向基函数激发下产生对应的隶属度;第二层完成控制规则的前件作用,它们与神经元产生每条规则的适合度;第三层是模糊输出层,完成加权输出.由于层数的减少,简化了模糊神经网络的结构.

径向基函数神经网络的学习过程,包括径向基中心集的选择、隐含层到输出层的权值确定两个层次,前者对变换函数的参数进行调整,采用的是非线性优化策略,RBF模糊神经网络的参数包括两个部分:前件(非线性)参数集和结论(线性)参数.

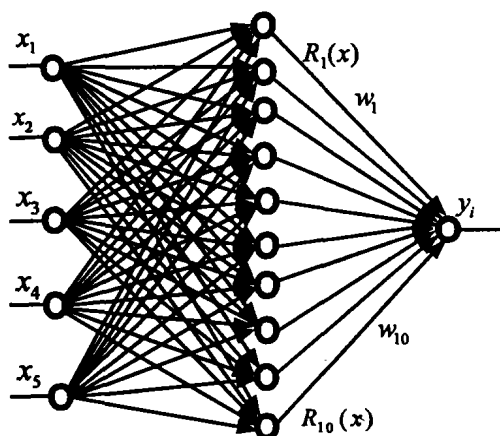


图8 基于RBF结构的模糊神经网络

Fig.8 Fuzzy neural network based on RBF structure

对于前件参数集,我们需要确定两个参数:接收函数的中心的位置和函数宽度参数(c, σ),这两个参数在前面已经确定下来了.结论线性参数的学习采用最小二乘法:由于隐层的每个接收单元的接收中心已经用模糊聚类的方法固定下来,并且模型具有相当的精度,因此学习时只需要修正隐层和输出层之间的权值,采用最小二乘法进行学习,具体的算法因为篇幅关系略去.在学习的算法中为了保证结果的正确性和快速收敛,通过设定以下的相等权值以保证其具有相关性:

$$w_2 = w_4 = w_8; \quad w_3 = w_9; \quad w_5 = w_6 = w_7 = w_{10}$$

在进行神经网络训练时,运行编制的神经网络程序,并利用前面的事例进行训练,利用另外的20个

样本对模糊神经网络决策进行验证,将抓取任务和物体本身的特征属性进行模糊估计打分,送入模糊神经网络得到相应的结果,结果是不符合人的抓取经验的抓取模式有2个,网络的正确率达到90%.

5 抓取控制和实验 (Grasp control and experiments)

计算机人机界面输入物体的特征属性,经模糊神经网络计算后得到合适的抓取模式,根据传感器反馈的信息,采用混合控制模式:先根据选择的模式调整手爪的姿态;根据接近觉传感器的信息调整手指和物体之间的位置;通过比较力传感器的信息和预先设定值控制抓取力的大小.在控制过程中,方式控制器在三种方式之间切换:手指位置调整控制、接近觉控制和力控制,抓取控制结构图如图9所示.控制电路的硬件由计算机、多路信号采集卡 AC6111 和 C51 单片机及一些外围控制电路以及驱动电机的功率放大电路 L293B 组成.

手指位置控制是通过单片机控制2相4拍步进电机来实现的,步进电机上安装的齿轮驱动另外两个换向齿轮进行联动调节,实现预定的姿势.步进电机由双极性步进电机驱动器驱动,角度脉冲数 = 需要旋转的角度/步距角.根据相应的抓取模式,单片机给出包括控制转向的脉冲信号和所需要转动角度的脉冲信号.

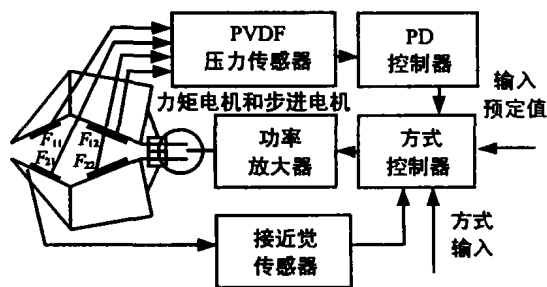


图9 基于传感器反馈的抓取控制结构

Fig.9 The grasp control frame based on the feedback of sensors

在手爪接近物体的阶段采用位置控制方式,首先用红外发光管与硅光敏组成接近觉探头,发射调制信号并进行光谱滤光,用接收的红外光强度来标定接近距离.利用接近觉传感器使物体迅速接近物体,当物体和手指接触以后,将控制方式切换到力觉控制方式.

控制手爪开合的24V直流伺服电机主要由单片机控制.通过控制输出信号的占空比控制电机转速,

输出信号控制驱动芯片控制电机的正反转,驱动手爪的开合.手指的闭合过程接触力的控制是稳定抓取的关键,由于欠驱动手爪的特点,输入和输出之间具有高度的非线性关系,各个手指之间的作用力相互耦合,因此无法采用精确的力控制模型实施控制,这里采用基于传感器的控制策略,采用图10所示的采集电路检测每个关节指面的接触力的大小,与设定的接触力进行比较,控制所有的接触力不能超过设定值,防止力过大对物体造成损害.

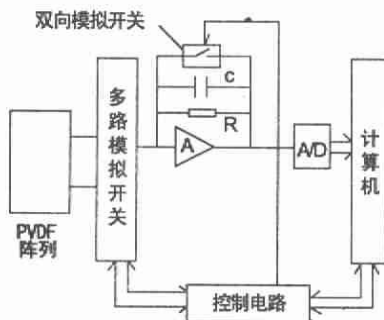


图10 接触力传感器信号采集电路

Fig. 10 The signal acquisition circuit of force sensors

在接触力反馈中,反馈增益为 k_f ,如果是精确抓取,接触力只有两个或三个手指的末关节,并且可以精确控制,因此反馈力 $F_f = (F_{11}, F_{11} + \dots + F_{1n})/n$, $n=2$ 或3(图9中只画出两个关节).当抓取是包络方式时,如果是三指三关节,反馈力 F_f 是所有接触力中最大的值,即: $F_f = \max(F_{11}, F_{11}, \dots, F_{33})$.如果仅仅用比例控制,将 $k_f F_f$ 与目标值 F_t 进行比较,则会因为欠驱动手指严重的非线性关系使得抓取过程产生振荡,不能稳定地抓取,这里将传感器上检测到的力反馈信号进行微分运算,采用PD调节方式,可以减少与物体接触时力的冲击.

最后,需要对抓取是否成功作评判,稳定性是衡量抓取质量的重要指标,也是抓取是否成功的关键.在文献[9]中,我们对欠驱动手爪各种抓取模式下的稳定性作了详细的分析,可以作为抓取稳定性评判的标准,而可操作性则是根据具体的任务要求来评判的,如果评判的结果达不到要求,则重新修改输入,进行再决策.

为了验证欠驱动手爪的自主抓取能力,我们对6种日常使用的物体进行自主抓取实验,对每种物体预先设定抓取的最大作用力,得到图11所示的抓取实验图,实验结果证明了自主抓取符合人类的抓取经验.

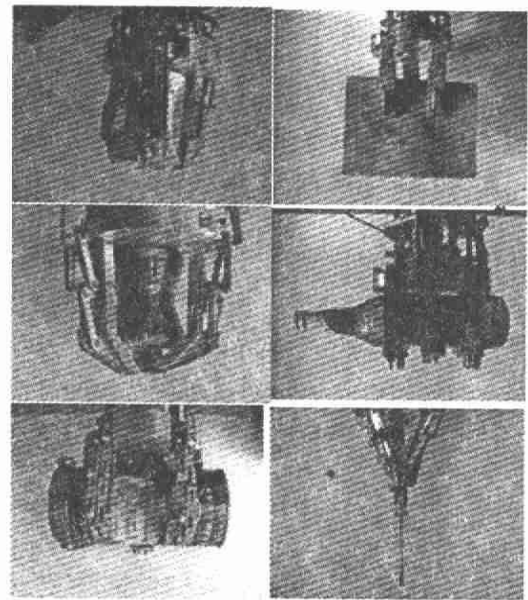


图11 欠驱动手爪抓取实验

Fig. 11 Grasp experiments of the underactuated robot hand

6 结论(Conclusion)

新型的多用途欠驱动手爪由于灵巧机构的作用,具有多种抓取姿态,并且控制方便,能抓取任意形的物体,具有独特的优点.抓取决策是欠驱动手爪自主抓取的关键,需要综合考虑抓取任务和物体本身的特征属性作为决策的依据,并且属性用模糊的表达方式更符合人在抓取时的思维习惯.基于传感器反馈的控制策略使得欠驱动手爪可以在几种模式下切换,在不同阶段选用不同控制模式,实现稳定抓取.自主抓取研究可以进一步提高机器人的自动化水平,为基于视觉技术自主抓取打下坚实基础.

参考文献 (References)

- [1] Liu Y, Mei T, Liang B, et al. Multisensory gripper and local autonomy of extravehicular mobile robot[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. New Orleans, LA: IEEE, 2004. 2969-2973.
- [2] Song Y, Zhu G C. Arm-hand integration system for intelligent robot[J]. The Journal of Robotics Technology and Application, 1999, 2(2): 21-24.
- [3] Jacobsen S C, Wood J E, Knutti D F, et al. The UTAH/M. I. T. dexterous hand; work in progress[J]. The International Journal of Robotics Research, 1984, 3(4): 21-50.
- [4] Gosselin C M, Lalibert'e T. Underactuated Mechanical Finger with Return Actuation [P]. USA: 5762390, 1998.
- [5] Birglen L, Gosselin C M. On the force capability of underactuated fingers [A]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Taipei, Taiwan: 2003. 1139-1145.

(下转第30页)

机控制软件,二是 PLC 程序. 上位机程序主要实现机器人视觉标定、医疗图像处理、机器人运动学反解和对 PLC 的状态对寄存器的读写等功能. 上位机程序对 PLC 进行运动参数设定,然后通知 PLC 程序激发其脉冲输出. 除了上述功能外,PLC 程序还要完成对继电器的控制和零位开关信号的采集等任务.

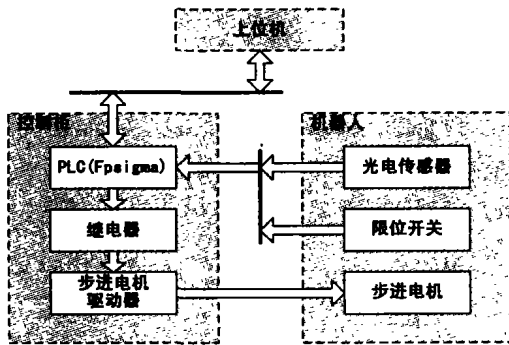


图7 控制结构图

Fig. 7 Control architecture

5 结论 (Conclusion)

以上所述的矫形外科机器人系统,在模拟手术室的环境中,成功地完成了导航试验,并且系统的精度满足胫骨髓内钉手术的要求. 系统还需通过对机器人参数标定进一步提高精度,以满足股骨髓内钉

的手术要求. 此系统的研究和实现为更加复杂的矫形外科手术的机器人系统的研究积累了一些技术基础和设计经验.

参考文献 (References)

- [1] Taylor R H. Robotics in orthopedic surgery [A]. Computer Assisted Orthopedic Surgery [C]. 1999. 35-41.
- [2] Liu D, Wang T M, et al. A surgical robot system for stereotactic neurosurgery [A]. 1st Korea-China Joint Workshop on Robotics [C]. 2001. 27-28.
- [3] Paul H A, Bargar W L, Mittelstadt B, et al. Robotic execution of a surgical plan [A]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. 1992. 1621-1623.
- [4] 罗先正,邱贵兴. 髓内钉固定[M]. 北京:人民卫生出版社,2000.
- [5] Bainville E, Bricault I, Cinquin P, et al. Concepts and methods of registration for computer-integrated surgery [A]. Computer Assisted Orthopedic Surgery [C]. 1999. 15-34.
- [6] 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [7] 吴瑞祥. 机器人学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1994.
- [8] Kazanzides P, Zuhars J, Mittelstadt B, et al. Architecture of a surgical robot [A]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. 1992. 1624-1629.

作者简介:

- 赵永涛 (1979-),男,硕士生. 研究领域:机器人控制技术.
 王田苗 (1960-),男,博士,教授,博导. 研究领域:先进机器人技术.
 胡磊 (1965-),男,本科,工程师. 研究领域:机械设计.

(上接第25页)

- [6] 梅凤翔,刘瑞,罗勇. 高等分析力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1991.
- [7] Chiu S L. Fuzzy model identification based on cluster estimation [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy System, 1994, 2(3): 10-15.
- [8] Roger J J-S, Sun C-T. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1993, 4(1):156-159.
- [9] Luo M Z, Mei T. Grasp analysis of an underactuated robot hand

[A]. Proceedings of the 2003 International Conference on Intelligent and Automation [C]. Hong Kong: 2003. 591-596.

作者简介:

- 路敏舟 (1973-),男,博士研究生. 研究领域:智能机器人,机电一体化.
 梅涛 (1962-),男,研究员,博士生导师. 研究领域:机器人,微机电系统.