

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.032

农业机器人果蔬抓取中滑觉检测研究*

周俊 朱树平

(南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 利用压敏电阻作为敏感材料制作了一种灵敏的滑觉传感器, 构建了滑觉信号观测系统。用短时傅里叶变换方法分析了滑觉信号的频谱特征, 并运用离散小波变换结果来区分法向抓取力变化与实际发生的滑动信号, 以使滑动信号检测结果不受法向抓取力变化的影响, 试验结果表明滑觉检测的稳定性。运用二指平行手爪进行了实际的果蔬抓取试验, 验证了基于滑觉检测的抓取力调节效果。

关键词: 农业机器人 滑觉传感器 离散小波变换

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0171-06

Slippage Detection in Gripping Fruits and Vegetables for Agricultural Robot

Zhou Jun Zhu Shuping

(Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: A kind of sensitive slippage sensor was developed by using piezoresistor, and a slippage observation system was constructed. The technique of STFT was applied to analyze the spectral information of slippage signal. Then slippage signal was distinguished with the signal resulted from different normal gripping forces by using the result of DWT. The experimental results showed that the slippage signal was able to be effectively extracted regardless of different normal gripping force. At last, the experiment of gripping force adjustment was carried out by using two parallel fingers hand equipped with the designed slippage sensor. The experimental results of grasping actual fruits and vegetables demonstrated the promise of this slippage sensor in the agricultural picking robot.

Key words: Agricultural robot Slippage sensor DWT

引言

当在果蔬采摘、加工等作业环节中引入农业机器人时, 经常需要末端执行器执行抓取作业^[1]。合适的抓取力既要能够避免果蔬滑落, 也要防止果蔬损伤^[2~3]。由于实际果蔬的形状、质量、成熟度等因素变异较大, 因此在采摘过程中, 农业机器人应根据作业对象实时调整抓取力, 使末端执行器既能稳定抓持住果蔬, 又能尽量减小果蔬的损伤。滑觉对于机器人以最小力稳定抓取物体、减小物体损伤起着重要作用^[4]。为了达到最小力抓取, 手爪与被抓物体之间的初始滑觉检测必不可少^[5]。

至今已有多种方法来检测滑觉, Dallar 等把表面贴有橡胶表皮的 PVDF 压电薄膜粘贴在被动柔顺手爪的手指上^[6], 用来感知手指是否与物体接触及手爪抬起物体的瞬间信号的变化情况, 当物体出现滑动时传感信号输出将出现瞬间波动。Hasegawa 等研制的智能机械手集成了接近觉、接触觉及滑觉传感^[7], 其滑觉传感器以压导橡胶作为敏感材料, 当滑动发生时滑觉传感器的输出将出现突然下降, 根据这个突变值来预测滑觉。Cotton 等把压电陶瓷双压电晶片作为动态力传感器来检测滑觉^[8], 当物体滑动时传感器输出信号的幅值将会增大, 通过设定合适的阈值可以检测出物体的滑动。Petchartee

收稿日期: 2012-01-15 修回日期: 2012-02-21

* 国家自然科学基金资助项目(31071325)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2010458)

作者简介: 周俊, 教授, 主要从事农业机器人、机器视觉与模式识别研究, E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

等制作了一种电阻阵列式触滑觉传感器^[9],触滑觉传感器中包含了204个传感单元,把传感单元的振荡频率作为滑动的判别标准。

这些滑觉检测的方法虽然取得了一定的效果,但是仍存在问题,尚没有成熟的滑觉传感器应用于商业手爪上^[8]。如PVDF压电薄膜输出的是电荷信号,对温度的变化非常敏感,大约为每摄氏度变化0.5%^[8]。压导橡胶在检测滑觉方面是一种比较好的材料,但是不易区别出法向力变化信号和滑觉信号。压电陶瓷双压电晶片传感器对噪声干扰较为敏感,当滑动速度较小时不容易检测到滑动信号。阵列式传感器检测滑觉的前提条件是传感器的分辨率和扫描频率必需足够高才能及时地检测到物体的滑动,以阻止物体滑落,此外阵列式传感器的结构复杂、线路多。

为此,本文以压敏电阻作为敏感材料制作一种灵敏的滑觉传感器,来感知抓取过程中的接触力和滑觉信息,并对机器人末端执行器进行反馈控制,通过平行二指手爪的实际果蔬抓取试验检验抓取力调节效果。

1 滑觉传感器结构

制作的滑觉传感器外形结构如图1所示。传感器由有机玻璃基板、FSR-406型力敏电阻和网格状橡胶表皮组成。FSR-406型力敏电阻是一种聚合物厚膜材料,其电阻随着传感表面压力的增加而减小,可以测量0.1~10 kg范围内的压力。网格状橡胶表皮用来保护传感器及增加传感器与接触物表面的摩擦。力敏电阻用双面胶粘贴固定在有机玻璃基板上。滑觉传感器输出经过调理电路转换成0~5 V电压输出

$$V_0 = \frac{V}{1 + \frac{R_F}{R_M}} \quad (1)$$

式中 V_0 ——滑觉传感器输出电压

V ——电源电压 R_M ——电阻,取21 k Ω

R_F ——力敏电阻当前电阻

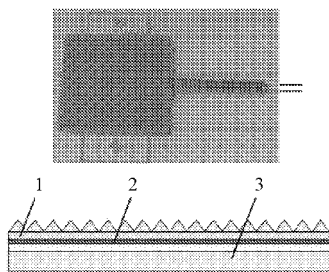


图1 滑觉传感器结构

Fig. 1 Structure of slippage sensor

1. 橡胶表皮 2. 力敏电阻 3. 有机玻璃基板

2 滑觉传感器输出及其频谱分析

滑觉检测试验装置如图2所示,在机器人二指平行手爪上分别安装有一个指力传感器和一个制作的滑觉传感器。末端执行器采用德国SCHUNK公司EVG 55 HUB 100型两指夹持器。指力传感器利用FSR-402型力敏电阻制作而成,用来测量被抓物体与手指之间的夹持力。

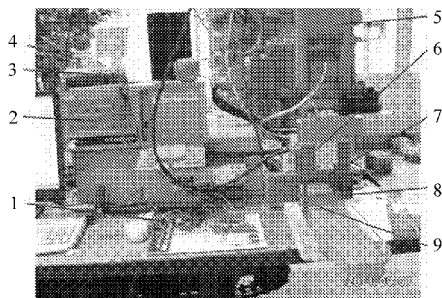


图2 滑觉检测试验装置

Fig. 2 Experimental equipment for measuring slippage

1. 数据采集卡 2. 端子板 3. 工控机 4. 信号放大器 5. 机械臂 6. 末端执行器 7. 触觉传感器 8. 滑觉传感器 9. 指力传感器

首先使用木块作为测试对象,观察其在末端执行器两指间滑动时滑觉传感器的输出。为了精确指示滑动发生时刻,以便与滑觉传感器输出信号进行对照,在试验台上还固定安装有一触觉传感器,它也是由FSR-406型力敏电阻制作而成。木块滑动前与该接触传感器接触,一旦木块滑动即与该接触传感器脱离,此传感器输出信号将会发生相应变化。指力传感器、滑觉传感器、触觉传感器的输出均连接至研华PCI-1710型多通道数据采集卡,最后由计算机进行信号处理。

试验过程中,将测试木块置于末端执行器两指之间,然后用2 N的夹持力闭合手爪,手爪闭合稳定后,以5~30 mm/s的速度拖动木块使其滑动。当木块在滑觉传感器表面滑动时,其典型的电压输出如图3所示。图中虚线表示触觉传感器的输出,当其由4.3 V降为0.67 V时,表示木块已离开触觉传感器开始移动,即木块在2.6 s时出现滑动。图中实线表示滑觉传感器的输出,它在2 s时开始出现剧烈变化,2.6 s时达到顶峰,在4 s后又趋于平稳。2~4 s时信号的剧烈波动反映了木块由静摩擦过渡到动摩擦的过程。在静摩擦区域滑觉信号已经出现了较大波动,因而只要采用合适的算法,在物体出现明显滑动前可以检测出物体的初始滑移。

为了寻找合适的算法有效地提取滑动信号的特征值,并反馈给末端执行器进行抓取力调节控制,为此对滑觉传感器输出信号进行短时傅里叶变换

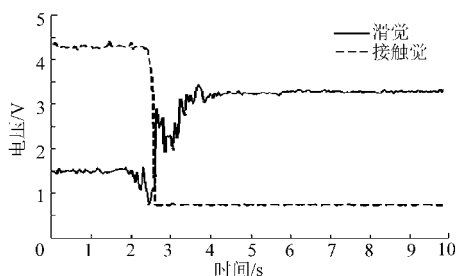


图3 滑觉和接触觉信号

Fig. 3 Slipping signal and contact signal

(STFT), 观察其所含的频谱成分, 其中输出采样频率设为 20 Hz。短时傅里叶变换的结果如图 4 所示, 图中横坐标表示时间, 纵坐标表示频率, 颜色表示频谱能量大小。

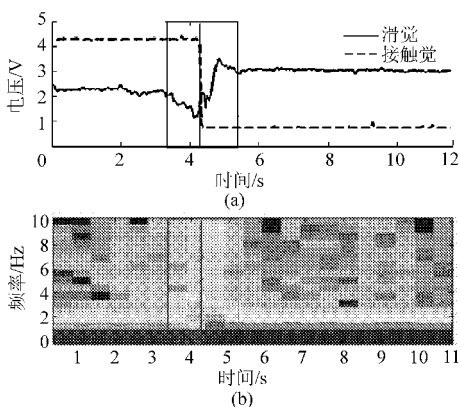


图4 滑觉传感器信号的短时傅里叶变换

Fig. 4 STFT of slipping sensor signal

(a) 滑觉和接触觉信号 (b) 滑觉信号短时傅里叶变换

从图 4 可以看出: 在 3.2 s 之前, 由于未拖动木块, 滑觉输出波动很小, 在频谱图上表现为较少的高频成分及较小的能量。然而, 在木块即将滑动前, 开始出现高频成分及较大的能量, 在 3.2 ~ 5.2 s 时间内, 木块由静摩擦过渡为动摩擦, 相对应的这一段时间内, 频谱图上表现为较多的高频成分及较大的能量。在 5.2 s 以后, 木块停止滑动, 频谱图上的高频成分减少, 能量也降低。高频成分产生的原因主要是由于摩擦力作用于压敏材料表面, 导致硅橡胶的剪切变形, 其内部电阻发生变化, 引起输出电压的改变^[10]。

3 基于离散小波变换的滑觉检测

从图 4 可以发现, 当滑动发生时 (3.2 ~ 5.2 s) 将出现频率大于 2 Hz 的频谱成分, 而无滑动时 (3.2 s 之前和 5.2 s 之后) 滑觉输出的频率大多低于 2 Hz。因而, 可以通过检测高频成分来检测滑移, 这里采用离散小波变换 (DWT) 的方法来检测信号瞬间的高频成分。信号经过 DWT 后, 会输出细节系数 (来自高通滤波器) 和近似系数 (来自低通滤波器), 这里

将利用细节系数来表征滑觉信号, 并以此对末端执行器进行抓取力调节控制。哈尔小波运算速度快, 可以保证检测的实时性, 本文选用哈尔小波对数据进行 1 层离散小波变换。

3.1 滑觉信号识别

两指末端执行器在抓取操作过程中, 当法向力加载和卸载时也会引起滑觉传感器的输出, 必须把它与被抓取物体滑动造成的滑动传感器输出分开。图 5、图 6 对比了滑动传感器这两种输出信号的离散小波变换结果, 可以发现两者间的小波系数幅值相近。从输出信号的短时傅里叶变换 (STFT) 频谱图 (图 7) 也可以发现, 抓取法向力加载和卸载时的确出现了较多大于 2 Hz 的频谱成分。因而, 单纯从频率特征无法区别出被抓取物体滑动信号与抓取法向力变化的信号。但是, 在法向力加载时信号的 DWT 细节系数大部分小于零, 在法向力卸载时信号的 DWT 细节系数大部分大于零, 而由被抓取物体滑动引起的传感器输出信号的 DWT 细节系数却既包含较大的正值也包含较大的负值。

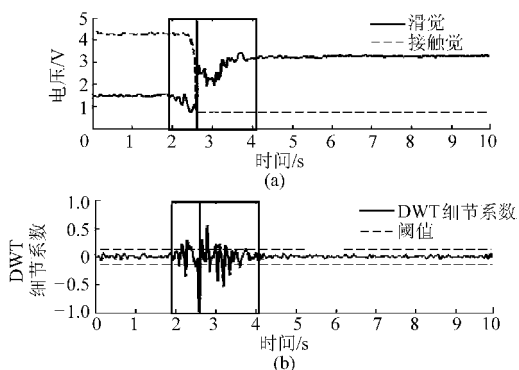


图5 抓取物体滑动时滑觉传感器输出及其 DWT

Fig. 5 Sensor signal and its DWT with slipping of grasped object

(a) 滑觉和接触觉信号 (b) 滑觉信号的 DWT

因此, 综合考虑滤除杂波干扰和感知被抓取物体滑动要求, 经过试验确定检测滑觉的法则为: 在物体抓取法向力加载过程中, 只要信号的 DWT 细节系数大于 0.13, 则认为有滑动产生; 在物体抓取法向力卸载过程中, 只要信号的 DWT 细节系数小于 -0.13, 则认为有滑动产生; 在法向力不变时, 只要信号的 DWT 细节系数绝对值大于 0.13, 则认为有滑动产生。

3.2 滑觉检测试验结果

为了评估基于离散小波变换的滑觉检测方法的效果, 根据抓取法向力、物体表面物理性质及滑动速度设计了 3 种类型的试验, 以观察滑觉传感器输出信号及其离散小波变换结果。

首先, 抓取法向力分别设为 1.5、2.0、3.0 和

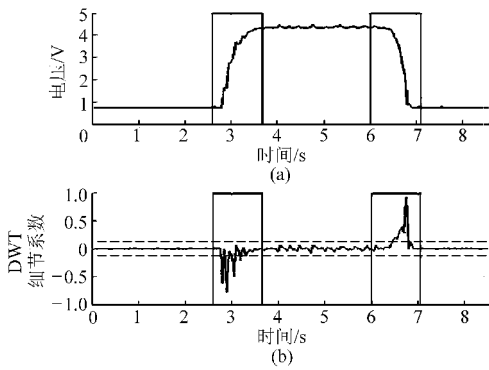


图6 抓取法向力加载和卸载时滑觉传感器输出与DWT

Fig. 6 Sensor signal and its DWT with loading and unloading of normal grasping force

(a) 滑觉传感器输出 (b) 滑觉信号的DWT

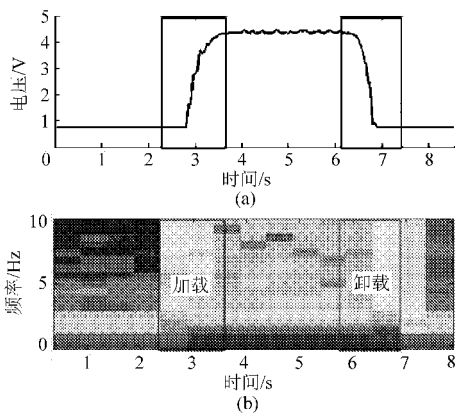


图7 抓取法向力加载和卸载时滑觉传感器输出的STFT

Fig. 7 STFT of slipping sensor signal with loading and unloading of normal grasping force

(a) 滑觉传感器输出 (b) 滑觉信号的STFT

4.0 N,以 15 mm/s 的速度滑动木块。然后,改变滑动物体表面材料性质,分别为木块、塑料、布料和纸张,法向抓取力均为 2.0 N,滑动速度同样为 15 mm/s。最后,保持法向抓取力 2.0 N 不变,以 8、15、25 mm/s 3 种速度在滑觉传感器表面匀速滑动木块。每次木块都滑动固定 50 mm 长度,然后根据记录的不同滑动时间计算出滑动速度。

试验结果显示,不同情况下传感器检测出的物体滑动信号及其离散小波变换结果与图 5 类似,这里不再重复给出相关数据的图形描述。不同抓取条件下滑觉信号与离散小波变换细节系数最大幅值(绝对值)之间的关系如表 1~3 所示。

从表 1~3 的统计结果可以发现,在不同抓取法向力、不同材质和不同滑动速度情况下,物体在出现明显滑动前,其 DWT 细节系数都出现了幅值大于 0.13 的结果。表 1 中,在抓取法向力为 4.0 N 时,物体滑动时的小波系数明显较 1.5、2.0 和 3.0 N 时小。这可能是因为压力越大,滑觉传感器的输出越

表 1 不同抓取法向力对滑觉信号检测的影响

Tab. 1 Effect of different normal grasping force on slippage detection

抓取法向力/N	滑觉信号 DWT 细节系数的	
	最大幅值	
1.5	-0.680 3	
2.0	-0.557 7	
3.0	-0.651 0	
4.0	-0.165 8	

表 2 不同抓取物体表面材质对滑觉信号检测的影响

Tab. 2 Effect of different surface materials of grasped object on slippage detection

表面材质	滑觉信号 DWT 细节系数的	
	最大幅值	
木块	-0.521 5	
塑料	0.711 4	
布料	0.272 8	
纸张	-0.233 1	

表 3 不同滑动速度对抓取信号检测的影响

Tab. 3 Effect of different sliding speeds on slippage detection

滑动速度 /mm·s ⁻¹	滑觉信号 DWT 细节系数的	
	最大幅值	
8	0.295 4	
15	0.984 3	
25	-0.357 4	

接近饱和值,当物体滑动时滑觉传感器的输出将被限制在一个较小幅值范围内变化,导致 DWT 细节系数较小。表 2 中,被抓取物体表面材料各不相同,当为纸张时小波系数比较小,这可能是因为纸张的表面摩擦因数较小,对滑觉传感器作用小导致输出波动小的缘故。表 3 中,对比了不同滑动速度对滑觉检测的影响,滑动速度为 8 mm/s 时小波系数要比滑动速度为 15 mm/s 及 25 mm/s 时的小波系数小。这主要是因为滑动越缓慢,物体对传感器橡胶表皮面作用也随之减弱,当最终没有滑动作用时小波系数绝对值应近似为零,这也正是期望的结果。

总之,在不同抓取法向力、不同材质和不同滑动速度情况下,物体滑动时滑觉传感器输出的 DWT 细节系数并没有呈现非常明显的差异和规律性,这除了与传感器本身性能有关外,还与试验条件有关,但是,通过设定合适的阈值,使用 DWT 细节系数都可以识别出物体的初始滑动。

4 基于滑觉检测的抓取力调节

根据前文研究发现,DWT 方法可以检测出被抓取物体滑动,且不受抓取法向力变化的影响,因此可

以根据抓取过程中的滑觉检测对末端执行器进行抓取力反馈控制。设计了3个实际物体抓取试验,来观察抓取力调节效果。试验在一个二指平行手爪上进行,手爪可以进行位置及力方式控制,试验装置如图8所示,右指安装滑觉传感器,左指安装标定好的指力传感器。滑觉传感器和指力传感器的输出反馈给平行手爪,对抓取力进行实时调节。

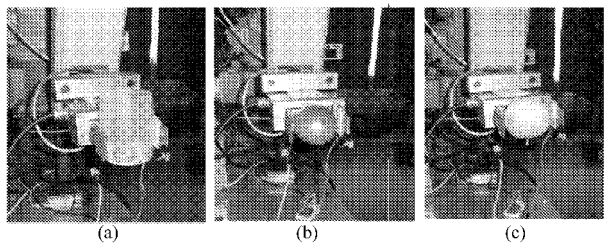


图8 抓取力调节试验

Fig. 8 Experiment of grasping force adjustment

(a) 塑料杯 (b) 番茄 (c) 苹果

试验1:以一定的力抓住一个空的塑料杯,然后,逐渐往塑料杯中添加硬币,使塑料杯的质量增加。当塑料杯即将出现滑动时,滑觉传感器将检测出滑移,并反馈给手爪,手爪将自动增加抓取力。

试验2:以一较大初始力抓住装有少量硬币的塑料杯,然后控制手爪不断减小抓取力,当抓取力减小到一定程度时滑觉传感器将检测到塑料杯的初始滑动,然后开始增加抓取力。重复以上操作,观察手爪能否抓住塑料杯而不使其滑落。

试验3:随机选择一质量为143 g的番茄和164 g的苹果,分别置于机器人末端手爪两指之间,然后基于滑觉传感器的检测结果增加机器人手爪抓取力,直至番茄和苹果不滑落并维持。

试验1和试验2的结果分别如图9和图10所示。试验前,已在塑料杯表面画上标记线,操作停止后,塑料杯的实际滑移大小可以通过量取当前抓取位置与标记线的距离得到。

从试验1的结果(图9)可以看到:在0.9、1.8、

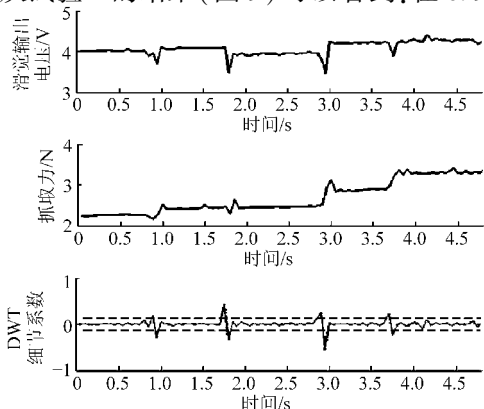


图9 试验1结果

Fig. 9 Results of experiment 1

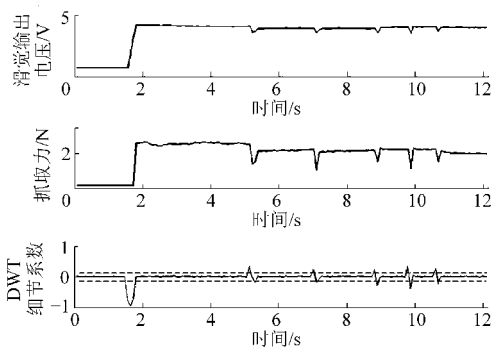


图10 试验2结果

Fig. 10 Results of experiment 2

2.9、3.7 s时刻,由于塑料杯中硬币质量的增加,滑觉输出的DWT细节系数均超过了阈值0.13(虚线),说明塑料杯开始出现滑动,手爪立即增加抓取力,以阻止塑料杯滑动,操作停止后测量发现塑料杯总共滑移了2 mm。从试验2的结果(图10)可以发现:当抓取力减小到一定程度后,滑觉传感器分别在5.1、7.1、9.0、9.9和10.8 s时检测到信号输出的DWT细节系数超出了阈值0.13(虚线),并反馈给手爪,手爪立刻增加抓取力以阻止塑料杯滑动,如此重复操作,操作停止后,测出塑料杯总共滑移了2 mm。经过多次测试证明基于滑觉反馈的平行手爪可以抓住物体而不使物体滑落。

试验3的结果分别如图11和图12所示。番茄和苹果的最小抓取力已事先测量得到,其中质量为143 g的番茄的最小抓取力为2.0 N,质量为164 g的苹果的最小抓取力为2.4 N。最小抓取力的获取方法如下:先以一个较大的力抓住物体,然后逐渐松开机器人手爪,当观察到物体开始出现滑移时,此时压力传感器的数值即被认为是最小抓取力,取物体的3个不同位置点进行测量,然后取平均值。

从图11可看到:在3.2 s时指力传感器与番茄接触,抓取力随后逐渐增加并稳定在1.2 N直到4.8 s时移开人手。由于此时抓取力小于番茄的最小抓取力2.0 N(虚线),番茄开始出现滑动,表现为

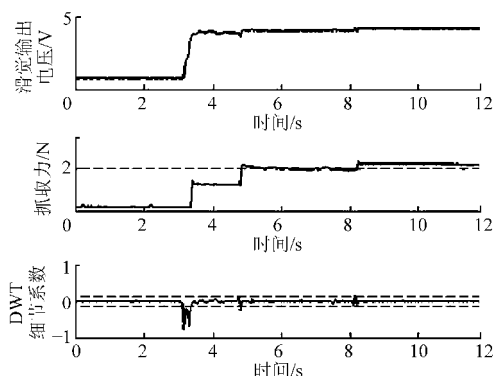


图11 番茄抓取力调节结果

Fig. 11 Adjustment of grasping force for tomato

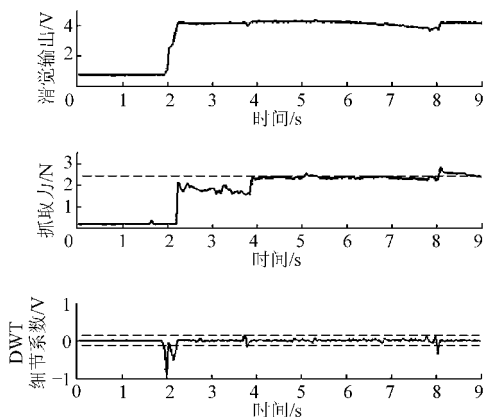


图12 苹果抓取力调节结果

Fig. 12 Adjustment of grasping force for apple

滑觉输出的 DWT 细节系数大于 0.13(虚线),在程序的控制下,手爪开始自动增加抓取力达到 2.1 N。随后,由于番茄及指力传感器、滑觉传感器的变形等原因导致抓取力出现微小的下降,在 8.2 s 时抓取力处于最小抓取力的临界点,滑觉传感器检测到初始滑移,并再次增加抓取力,最后抓取力维持在 2.2 N。

在图 12 中可以看到:在 2.2 s 时指力传感器与苹果接触,抓取力逐渐增加,由于人手的抖动,此后抓取力出现一些波动。在 3.8 s 时移开人手,由于此时的抓取力小于苹果的最小抓取力 2.4 N(虚

线),苹果开始出现滑动,手爪自动增加抓取力并正好达到 2.4 N。在 3.8 ~ 7.8 s 时间内,抓取力均维持在 2.4 N,直到 7.8 s,同样由于传感器压缩,苹果表面变形等原因导致抓取力出现微小下降,直至低于最小抓取力,苹果出现滑移趋势,滑觉传感器检测到滑移信号,抓取力得到增加。在 8.0 s 时,滑觉传感器再次检测到滑动并增加抓取力,保持苹果不滑落。整个抓取过程中,果蔬未发生滑落,并且抓取力也未出现大的超调,从而有效地防止果蔬抓取损伤。

5 结论

(1) 以压导力敏电阻作为敏感材料制作了一种灵敏的滑觉传感器,来检测机器人手爪与被抓取物体之间的滑动。

(2) 短时傅里叶变换方法分析表明,滑觉信号中包含较多的高频成分。离散小波变换方法可以有效地提取出机器人手爪抓取过程中的滑动信号,且不受抓取法向力变化的影响。

(3) 以离散小波变换细节系数作为反馈信息,基于二指平行手爪的实际抓取试验验证表明,制作的滑觉传感器可以应用到农业机器人果蔬抓取中,再结合合理的力调节控制方案,能够实现农业机器人在复杂作业环境中对果蔬的无损抓取。

参 考 文 献

- 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109 ~ 112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109 ~ 112. (in Chinese)
- 崔鹏,陈志,张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 149 ~ 153.
Cui Peng, Chen Zhi, Zhang Xiaochao. Statics analysis of apple picking robot humanoid manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 149 ~ 153. (in Chinese)
- 杨庆华,金寅德,钱少明,等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 154 ~ 158.
Yang Qinghua, Jin Yinde, Qian Shaoming, et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 154 ~ 158. (in Chinese)
- Damian D D, Martinez H, Dermitzakis K, et al. Artificial ridged skin for slippage speed detection in prosthetic hand applications [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 2010: 904 ~ 909.
- Teshigawara S, Tsutsumi T, Shimizu S. Highly sensitive sensor for detection of initial slip and its application in a multi-fingered robot hand [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011: 1 097 ~ 1 102.
- Dollar A M, Jentoft L P, Gao J H, et al. Contact sensing and grasping performance of compliant hands [J]. Autonomous Robots, 2010, 28(1): 65 ~ 75.
- Hasegawa H, Mizoguchi Y, Tadakuma K, et al. Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, AK, 2010: 777 ~ 784.
- Cotton D P J, Chappell P H, Cranny A, et al. A novel thick-film piezoelectric slip sensor for a prosthetic hand [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 752 ~ 761.
- Petchartee S, Monkman G. Slip prediction through tactile sensing [J]. Sensor and Transducers Journal, 2008, 90: 310 ~ 324.
- Teshigawara S, Tadakuma K, Ming A, et al. Development of high-sensitivity slip sensor using special characteristics of pressure conductive rubber [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009: 3 289 ~ 3 294.