

基于滑觉检测的农业机器人果蔬柔性抓取控制研究

张妮妮, 袁路路

(河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473000)

摘要: 果蔬采摘是水果蔬菜生产种植中最繁琐、最耗时间、最费精力的部分之一,直接影响果蔬日后的价值和销售。随着经济的快速发展、外出务工人员增多及农业劳动力减少,劳动力在果蔬种植成本所占比例越来越大。实现果蔬自动化采摘是降低成本、释放农业劳动力的重要举措。20世纪80年代,美国成功生产了世界上第1台西红柿采摘机器人。近年来,随着信息技术和自动化技术的高速发展,农业采摘机器人的研究和开发取得了很大进步,但对果蔬柔性抓取的研究进展较慢。为此,基于滑觉传感检测技术与果蔬损伤机理,以农业机器人采摘控制系统为研究平台,运用离散小波变换算法,从传感器和抓取力控制着手,深入研究和设计了农业机器人柔性无损采摘控制系统。试验表明:系统运行稳定,可靠性强,对实现果蔬柔性采摘具有十分重要的应用意义。

关键词: 果蔬采摘; 柔性抓取; 滑觉检测; 小波变换

中图分类号: S225.92; TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2017)06-0228-05

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2017.06.045

0 引言

随着经济的不断发展,社会生活水平有了显著提高,人们开始重视水果蔬菜的质量,农业种植生产结构开始逐渐调整。果蔬的采摘作业费时费力,而且危险性高。由于信息技术与机电一体化的高速发展,以及机器人的研究与应用逐渐深入,人们开始用机器人去替代这些简单、繁琐的劳动,并要求机械采摘手臂在采摘果蔬时不造成损伤,因此采摘手臂在作业过程中既要能稳稳抓住果蔬,又要尽量减少对果蔬的损伤。而各种果蔬的形状大小以及成熟度不同,夹持力太大容易损害果蔬,夹持力太小果蔬容易滑落,因此夹持力要根据果蔬的大小进行灵活调整。本文将从滑觉检测技术出发,以机器手臂夹持力度控制为基础,根据果蔬的特定性质和机械损伤机理,设计和研究农业机器人果蔬柔性抓取控制系统,实现对果蔬柔性的无损采摘。

1 农业机器人果蔬损伤机理

机械手臂采摘果蔬时,最理想的状态是机械手臂能够以最小的夹持力稳定采摘果蔬。在采摘果蔬过程中,机械手臂会对果蔬有一定的夹力,由于力的相

互作用,果蔬也会受到一对方向相反的外力;而由于受到重力的作用,果蔬还要受到一对向上的摩擦力。对于果蔬来说,夹持力给果蔬的摩擦力是果蔬不掉落的重要因素。采摘过程中果蔬受力作用如图1所示。

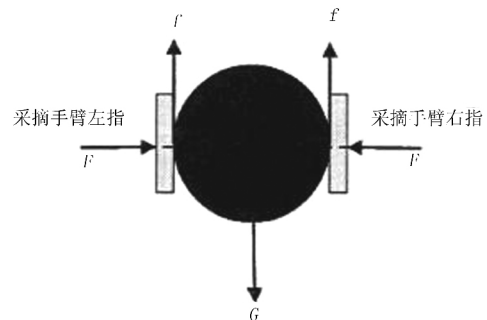


图1 采摘过程中果蔬的受力作用图

Fig. 1 Stress function of fruits and vegetables during picking process

图1中,假设采摘手臂左右指对果蔬的力满足水平方向,果蔬不掉落必须满足的条件为

$$2\mu F \geq G \quad (1)$$

即
$$F \geq \frac{G}{2\mu} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, μ 为采摘手臂左右指与果蔬之间的摩擦因数; F 为采摘手臂左右指对果蔬的夹持力; G 为果蔬自身的重力。

农业采摘机器人在工作中,采摘对象种类较多,工作环境也复杂多变。对于任何待摘对象,无法提前知道其质量和与采摘手臂左右指的摩擦因数。根据弹性摩擦重力公式,具有弹性的物体摩擦力为

$$F_c = (KF^{\alpha-1})F \quad (3)$$

其中, F 为采摘手臂左右指对果蔬的正压力;

收稿日期: 2016-03-03

基金项目: 河南省自然科学基金项目(2015ZCB115);南阳市科技攻关项目(2012GG029)

作者简介: 张妮妮(1985-),女,河南南阳人,助教,硕士。

通讯作者: 袁路路(1982-),女,河南南阳人,讲师,硕士,(E-mail) wwdll80@qq.com。

$KF^{\alpha-1}$ 相当于摩擦系数 μ ; α 为一个小于 1 的数。式 (3) 表明: 采摘手臂左右指对待摘对象压力越大, 它们之间的有效摩擦系数越小。因此, 对于待摘对象, 其有效静摩擦系数是变化的, 无法人为设定最小夹持力去采摘目标对象。

2 农业机器人滑觉检测原理

利用农业机器人采摘收获果蔬时, 常常需要依靠采摘手臂进行采摘工作。为了稳定柔性地抓取果蔬, 又不至于造成果蔬机械损伤, 采摘手臂左右指的夹持力要调节得非常合适、准确, 因此滑觉检测对采摘机器人柔性抓取目标对象及减少机械损伤有着重要作用。想要采摘手臂以最小的夹持力抓取物体, 必须要检测被摘对象表皮与采摘手爪之间的初始滑觉。本文采用压敏传感器作为压控电路的重要部分, 设计了一款灵敏程度非常高的滑觉传感器, 用来测量采摘过程中的初始滑觉。

2.1 滑觉检测机构

滑觉传感器是滑觉检测机构的重要部分, 是主要用于检测采摘手的手爪与被摘对象之间相对滑动的装置。其通过实时检测待摘对象表面的相对滑动, 判断采摘过程中的握力, 在不损伤目标物体的情况下逐渐增加力量, 采摘目标物体。本文设计的滑觉传感器主要包括力敏导电硅胶、有机玻璃基板、聚合物薄膜力敏电阻及放大电路等部分。滑觉传感器结构如图 2 所示。

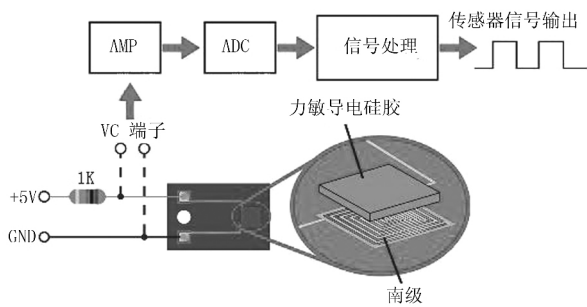


图2 滑觉传感器结构图
Fig. 2 Slip sensor structure

滑觉传感器的正负电极相互交替盘绕成螺旋结构, 水平安放在环氧树脂玻璃基板上, 力敏导电硅胶安装在正负电极的正上方。滑觉传感器工作时, 放大电路将检测正负电极的电压信号放大, 并通过 ADC 芯片转化成数字信号, 最终交由处理器进行信号分析与处理, 进而判断物体是否产生滑动。该滑觉传感器结构简单, 传感区接触面积大, 线路精简可靠, 干扰少, 且后续处理容易。

2.2 滑觉传感器的信号输出

机器人采摘手臂两指上都装有压力和滑觉传感器。压力传感器结构和滑觉传感器大致一样, 其核心也是压敏电阻及放大电路等。在实验过程中, 将测试的苹果放在采摘手两指间, 并以 2N 左右的力闭合。待闭合稳定后, 来回拖动苹果滑动时, 滑觉传感器将有信号输出, 如图 3 所示。

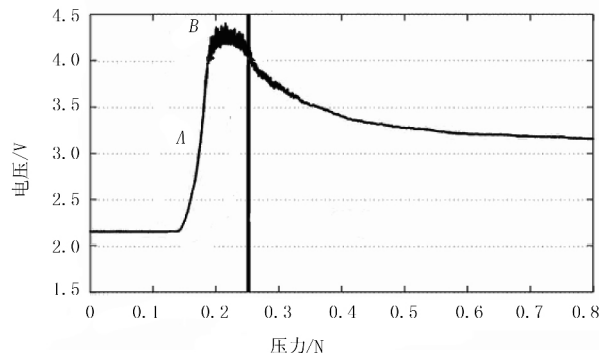


图3 滑觉传感器的电压信号输出
Fig. 3 Voltage signal output of slip sensor

图 3 中 A 点之前为静摩擦区域, B 点之后为动摩擦区域; A 点表示苹果在受力情况下要移动但还没实际位移, B 点表示苹果已经开始移动。在 A 时刻, 苹果受切向力产生切向变形, 电压信号 V 变大; 在 B 时刻, 受外力的作用, 苹果沿着滑觉传感器表面发生滑动的瞬间, 压敏电阻值不稳定, 传感器输出的电压信号 V 有比较复杂的波动现象。由图 3 可以看出: 在静摩擦力区域, 滑觉信号已经出现明显波动, 结合准确的算法, 完全可以在苹果出现明显滑动时检测出其初始摩擦力。

2.3 滑觉传感器频谱分析

为了在静摩擦区域获取有效滑动的电压信号, 检测物体的静摩擦力, 需要获得适合的算法, 将信号准确反馈给控制系统对夹持器进行抓取力控制; 然后, 对输出信号进行短拉斯变换, 以观察其频谱成分。滑觉传感器的信号输出和短拉斯变换的结果分别如图 4、图 5 所示。

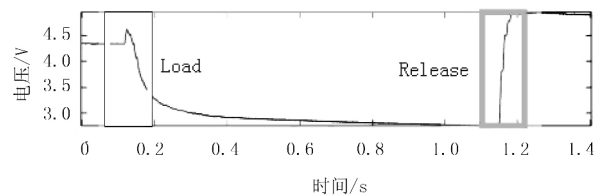


图4 滑觉传感器的信号
Fig. 4 Slip sensor signal

图 5 中, 横坐标表示时间, 颜色的深浅说明频谱能量大小程度。结合图 4、图 5 可以看出: 在 0.15s 前, 物体没有实际位移, 拉力较小, 滑觉传感器输出的

信号无明显变化,在这区间的信号中只有少量高频成分和能量;在物体移动的瞬间,拉力增大,切向变形变大,输出信号波动幅度大,出现大量的高频成分和能量;在物体停止移动时刻,高频成分和能量同时大量减少。

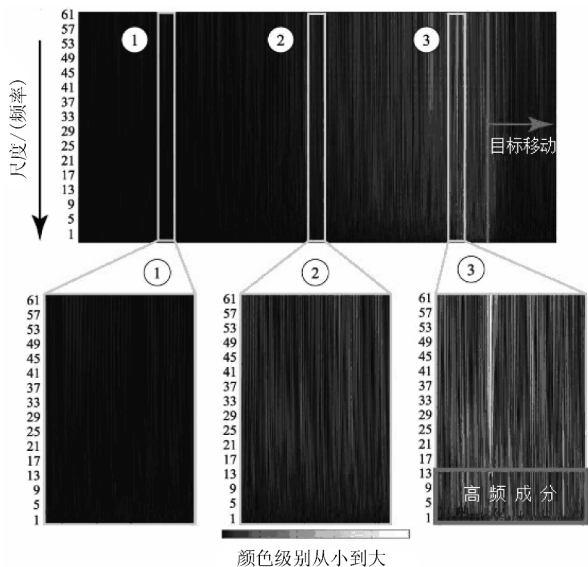


图5 滑觉传感器信号的频谱分析
Fig.5 Spectrum analysis of sensor signal

3 基于离散小波变换的滑觉检测

由滑觉传感器频谱分析可知:当夹持器与采摘对象发生滑动、产生动摩擦力时,频谱信号中会出现大于2Hz高频成分;当只有静摩擦力时,频谱信号中的频率成分都小于2Hz。因此,可以通过离散小波变换检测滑觉传感器输出信号瞬间的频率分布,判断初始滑动。

离散小波变换是一种比较方便、好用的时域分析方法,是结合傅里叶变换和拉斯变换的优缺点形成的,已广泛应用于信号处理、机器视觉、图像处理、模式识别及机器学习等领域。离散小波变换在时域和频域具有很好地局部化特征,可以采集处理信号并提供各个频率子端的频谱能量或者频率信息。利用小波基函数可以将 $\psi(t)$ 进行收缩和平移,则

$$\psi_{j,\tau}(t) = a^{\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (a > 0, \tau \in R) \quad (4)$$

其中 j 为尺度系数; t 为平移系数。

任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 离散小波变换为

$$W_x(j, k) = \int_R f(t) \overline{\psi_{j,k}(t)} dt \quad (5)$$

离散小波信号是在尺度-位移的平面上,它对应的是些离散的信号点。离散小波信号点分布如图6所示。

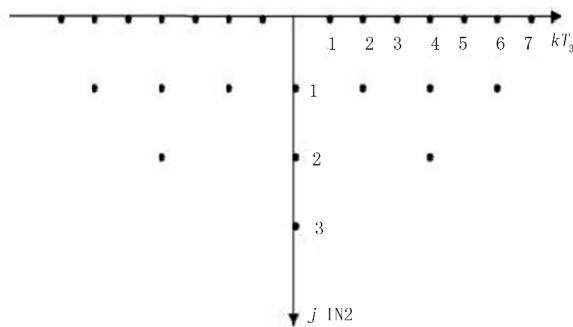


图6 离散小波信号点分布图

Fig.6 Discrete wavelet signal point distribution

采用离散小波变换技术对传感器输出的信号进行收集、处理,并提取电信号中的高频分量,设定合适的阈值,然后通过比较离散小波变换的小波系数和阈值的关系,判断物体是否发生初始滑动。

农业机器人末端夹持器在作业过程中,在法向力加载和卸载期间也会产生滑觉信号,在检测时要注意将其与待测物体滑动引起的滑动信号区别开来。法向力作用下的频谱分析如图7所示。

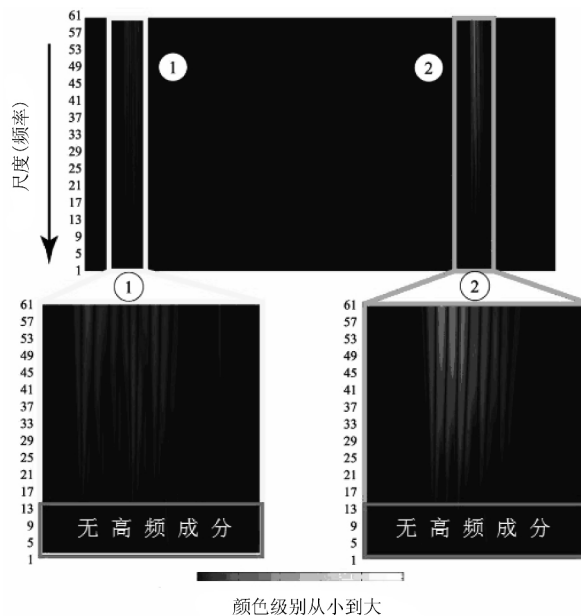


图7 法向力作用下的频谱分析

Fig.7 Spectrum analysis under normal force

结合图5和图7进行分析,可以发现两者小波系数数值差别很小,在法向力作用下,装载和卸载时同时伴有高频成分存在。因此,不能单单只从频率特性判断待摘物体的滑动信号。但是,在加载时输出信号的幅值因子小于零,卸载时幅值因子大于零,而待测物体滑动时滑觉传感器输出信号幅值因子有正值和负值。因此,在判断过程中,加载法向力时,只要是离散小波信号幅值因子大于0.15,则认定待摘物体发生滑动;卸载法向力时,只要是离散小波信号幅值因子小于-0.15,则认定待摘物体发生滑动;无法向力作用

时,离散小波信号幅值因子大于0.15,则认定为有滑动产生。

4 滑觉检测柔性采摘抓取力的控制

本文设计了实物抓取实验,测试抓取力控制的灵敏度,测试过程如图8所示。实验在单一机械手的单向运动中进行,机械采摘手左右两指都装有滑觉传感器,测试过程中控制周期为10ms。首先,机械采摘手以最小抓力夹持空塑料瓶,机械手处于夹紧状态;然后,向空塑料瓶逐渐加水,即慢慢加大被抓物体的质量;当塑料瓶整体质量接近由抓取力产生的摩擦力时,塑料瓶开始有滑落的迹象;在出现滑动迹象时,滑觉传感器输出信号被控制系统检测到,并迅速增大机械采摘手抓取力夹紧被抓物体。

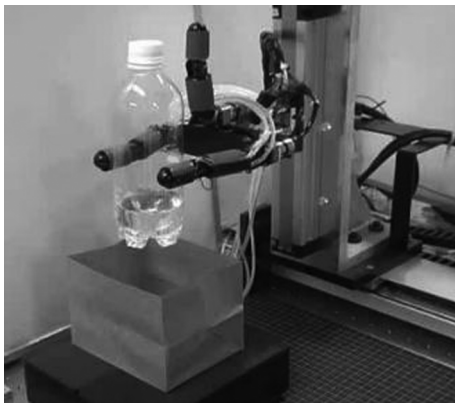


图8 机械采摘手抓取实验

Fig. 8 Mechanical picking hand grab experiment

机械采摘手抓取空瓶调节结果与离散小波信号细节因子分析如图9、图10所示。

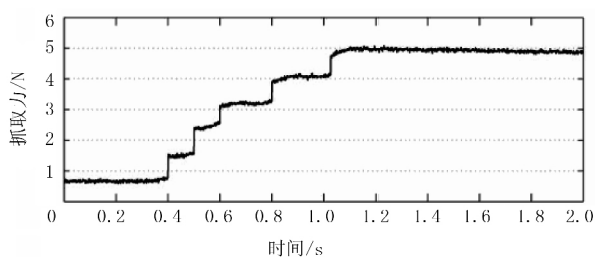


图9 机械采摘手抓取空瓶调节结果

Fig. 9 Mechanical picking hand grab empty bottle adjustment results

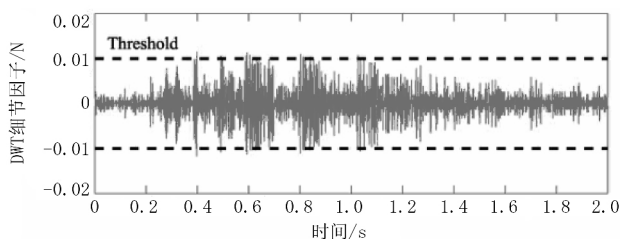


图10 离散小波信号细节因子分析

Fig. 10 Discrete wavelet signal detail factor analysis

由图9、图10可知:在整个过程中,机械手可以实

现以最小抓力抓取该物体,被抓物体没有发生滑落,向下滑动位移只有0.5mm,抓取力调节比较稳定,能有效减少采摘过程中对果蔬的机械损伤。

5 结束语

随着采摘机器人作业环境的复杂化,对末端执行器性能要求越来越高,自动化代替作业的同时,还要求其能对果蔬减少损伤。本文基于滑觉传感器技术,以末端执行器为研究对象,运用离散小波变换算法,设计和研究了农业机器人无损抓取控制系统。测试结果表明:末端执行器在抓取过程中,对抓取力控制非常精准,抓取力调节比较稳定,减少了末端执行器中对果蔬的机械损伤。这一研究对实现果蔬柔性采摘具有重要的实际应用意义。

参考文献:

- [1] 冯良宝. 基于滑觉和力外环控制的水果抓取控制算法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [2] 朱树平. 基于滑觉检测的农业机器人果蔬抓取研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [3] 尹云. 基于触滑觉控制的智能假手关键问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [4] 胡燕清, 陈进军, 胡国清. 一种声电式滑觉传感器的实现与测试[J]. 传感器与微系统, 2011(3): 128-131.
- [5] 尚振东, 王恒迪, 马伟, 等. 一种高实时性滑觉传感器滑动程度判别模式[J]. 传感器技术, 2005(2): 16-18.
- [6] 陈卫东, 董艳茹, 陈颖. 一种新型触滑觉传感器的试验研究[J]. 压电与声光, 2010(4): 571-573, 577.
- [7] 杨鹏. 多传感器信息融合技术在移动机器人避障中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.
- [8] 王光国. 基于DSP+FPGA机器人敏感皮肤实时信号处理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [9] 蔡春风. 人体表面肌电信号处理及其在人机智能系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [10] 童利标. 多传感器手爪数据融合与数据传输的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [11] 罗志增. 机器人多感觉传感器系统与多信息融合技术[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [12] 张玉. 近地面果蔬采摘机器人末端执行器及机械臂的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [13] 何建凯. 基于触滑觉反馈的假手控制系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [14] 姬伟, 罗大伟, 李俊乐, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. 农业工程学报, 2014(9): 19-26.
- [15] 周俊, 杨肖蓉, 朱树平. 基于自适应神经模糊网络的果蔬抓取力控制[J]. 农业机械学报, 2014(7): 67-72.
- [16] 王学林. 农业机器人末端执行器抓持力控制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.

- [17] 丁媛媛,金寅德. 采摘机器人柔性末端执行器抓取策略研究[J]. 制造业自动化, 2013(24): 19-22.
- [18] 丁俊香. 一种基于理想可流动成型导电橡胶的三维柔性触觉阵列传感器若干问题的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [19] 刘旭东. 气动安全柔性关节的设计及其在机器人手指中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [20] 周韶威. 仿生机器人触须传感器的建模与仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [21] 金寅德. 基于FPA的气动柔性苹果采摘末端执行器研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [22] 惠耀. 基于IPMC型人造肌肉的柔性机械手设计与测试[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [23] 向婷,陈进军. 基于新型压阻触觉传感器软抓取机械手的研究[J]. 制造业自动化, 2013(6): 69-71.
- [24] 陈娟,杨奇科,周晶杰. 基于LabVIEW的小波变换在信号滤波中的应用[J]. 技术与市场, 2013(5): 51-52.
- [25] 谢娜. 基于PVDF的三维触觉/热觉传感器的设计与仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [26] 王明. 基于小波分析的声发射信号处理在损伤诊断中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [27] 王学林,肖永飞,毕淑慧,等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2015(1): 58-63.

Design of the Control System of Fruit and Vegetable Flexible Grasping of Agricultural Robot Based on Slip Detection

Zhang Weiwei, Yuan Lulu

(Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: Fruit and vegetable picking fruit cultivation of vegetable production in the most complicated, the most time consuming, the cost of effort on the part of the one, which has a direct impact on the future value and sales of fruit and vegetable. With the rapid development of economy, migrant workers increased, reduced agricultural labor force, labor in the fruit and vegetable planting costs accounted for an increasingly large proportion. Fruit and vegetable automatic picking is an important measure to reduce the cost and release the agricultural labor force. In the 1980s, the United States has succeeded in producing the first Tomato Picking Robot, in recent years, with the rapid development of information technology and automation technology, agricultural harvesting robot research and development has made great progress, but research on fruit and vegetable soft grasping into development is slow. This paper based on slipping sensing detection technology of fruits and vegetables, damage mechanism, the agricultural robot picking control system as the research platform, the use of discrete wavelet transform algorithm, from the start of sensor and grasping force control, in-depth study and design the agricultural robot flexible nondestructive picking control system. The experiments show that the control system stable operation, high reliability, for the fruit flexible pick has very important significance.

Key words: fruit and vegetable picking; flexible grasping; slip detection; wavelet transform