

基于灰色预测控制的果蔬抓取系统设计与试验

王学林, 姬长英*, 周俊, 姜莉, 顾宝兴

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为使末端执行器和变形果蔬间的抓持力快速低超调地跟踪设定力, 提出基于灰色预测的增量式比例积分 (PI) 力控制算法。该算法通过采集果蔬受到的抓持力建立灰色预测模型, 当预测模型精度较高或较低时, 相应地加大或减小预测力偏差在综合力偏差中的权值, 使力控制器可以利用过去、当前和未来的果蔬抓持力信息来计算合适的控制校正量对抓持力偏差进行预补偿, 可以使控制器获得超调量小和响应快速的特点, 对末端执行器和果蔬之间的动态抓持过程具有适应性。果蔬抓持试验证明了灰色预测 PI 力控制算法的有效性, 可减小果蔬抓持损伤。

关键词: 机器人, 力控制, 算法, 抓持, 灰色预测

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.03.019

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-03-0112-06

王学林, 姬长英, 周俊, 等. 基于灰色预测控制的果蔬抓取系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 112-117.
Wang Xuelin, Ji Changying, Zhou Jun, et al. Design and experiment of fruit and vegetable grasping system based on grey prediction control[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 112-117. (in Chinese with English abstract)

0 引言

由于果蔬采摘作业的复杂性, 农业机器人采摘成功率低, 损伤率高^[1-4]。引起损伤率高的一个主要原因是末端执行器抓持果蔬力过大或过小, 导致抓伤或脱落^[5-6]。果蔬在抓持过程中会发生变形, 使抓持力变化并减小^[7-8], 采摘中应考虑果蔬变形对末端执行器夹持力的影响。末端执行器在抓持住果蔬后, 常用的方式是扭断和切断果梗^[3,9-10], 对夹持果蔬力的稳定控制尤为重要。预测物体抓持力变化是人手成功抓取和操作物体的一项重要的控制策略^[11]; 同样对机械手来讲, 抓取时仍需在线预测物体的刚度变化, 目的是以指定的设定力快速地将机械手指移动到估计的变形位置处, 在这过程中确保力以最大的收敛响应速度到达接触位置, 且无振荡和超调出现^[12-13]。可是直接预测抓取过程中的果蔬刚度变化并不实际, 本文直接预测抓持力, 提出一种基于灰色预测增量式比例积分 PI (proportional integral) 力控制算法, 目的使末端执行器和果蔬间的抓持力快速低超调地跟踪设定力。

1 力控制硬件组成

该抓取试验系统由末端执行器、单膜片联轴器 (C5)、松下数字伺服电机 (MINAS A4, 50W) 及驱动器 (MADDT1205, 200V)、微量程测力传感器和放大器 (CH-400/BS-100, 微量程 0~100N, 输出信号 0~5 V)、

研华数据采集卡 (PCI1710-CE)、研华运动控制卡 (PCI-1240U)、研华工控机 (IPC-610H)、稳压电源 (+12 V) 等组成。力传感器的满量程测量精度误差为 0.3%FS。试验硬件框架如图 1 所示, 其中的虚线为外接控制电源线路, 由稳压电源提供 12 V 直流电, 分别向控制卡、信号放大器、交流伺服驱动器提供所需要的控制电源。试验现场如图 2 所示。

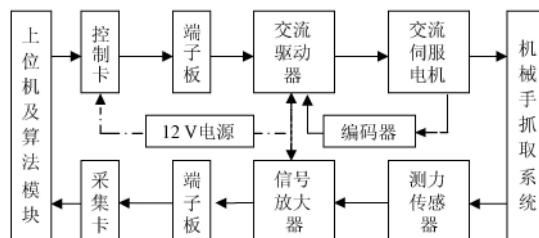


图 1 力控制硬件结构示意图

Fig.1 Hardware schematic diagram of force control

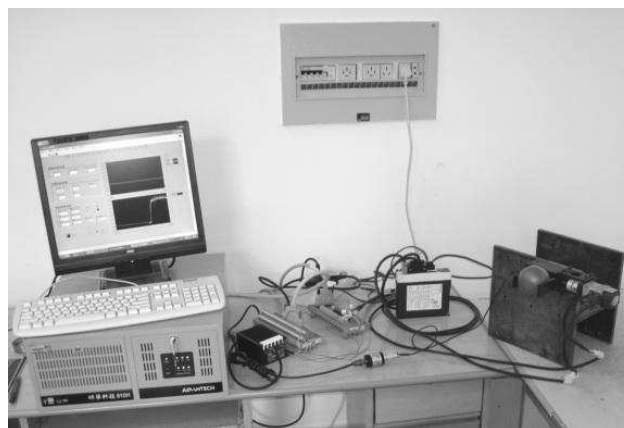


图 2 果蔬抓取系统

Fig.2 Grasping system of fruit and vegetable

收稿日期: 2009-09-09 修订日期: 2009-12-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA10Z259)

作者简介: 王学林 (1975-), 男, 博士, 研究方向为农业机器人。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: wxl0036@yahoo.com.cn

*通信作者: 姬长英 (1957-), 男, 教授, 研究方向为农业机器人。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: chyji@njau.edu.cn

1.1 上位控制计算机

整个抓取力控制系统采用上、下位机二级结构，工控机作为主控制器，其上运行抓取控制系统主程序，提供用户界面并根据数据采集提供的信息完成数据采集、运算、控制等，并将运算结果下达给运动控制卡（下位机）。本系统上位机选用研华 IPC610-H 工控机，CPU 为 Intel(R) Core(TM)2 双核 2.66 GHz，内存 2 GB。下位机选用研华 PCI1240U，它是基于 PCI 总线的高速 4 轴步进、脉冲式运动控制卡，卡上专用 CPU 与 PC 机 CPU 构成主从式双 CPU 控制模式。运动控制卡配备内容丰富、功能强大的运动函数库，供用户完成电机的运动控制。

1.2 末端执行器设计

末端执行器采用螺旋传动，因其结构紧凑，传动平稳，无噪音，能够获得较大的减速比和力的增益。所设计的末端执行器主要部件有机架、螺母、具有左旋和右旋 2 段螺纹的双向螺杆等组成，如图 3 所示。末端执行器本体长 165 mm，宽 125 mm。在左旋螺母 2 中，内嵌微量程测力传感器。螺杆作为旋转部件，通过联轴器直接与伺服电机相连，螺杆的 2 段螺纹分别与左旋和右旋螺母旋合，2 段螺纹标准为 M10×1.25-53 mm。在机架上的内三角形导轨作为 2 个螺母移动的定位机构，2 个螺母之间最大夹持直径为 86 mm。设定的伺服电机最大转动速度为 800 000 PPS（4 800 r/min），PPS 为伺服电机的脉冲速度，即每秒所送出的脉冲数，所选用的松下 MINAS A4 数字伺服电机每

转需要发送 10 000 个脉冲。螺母、螺杆的导程均为 l ，当电机转动角度为 φ 时，2 个螺母沿螺杆对称移动的距离为

$$s=l\varphi/\pi \tag{1}$$

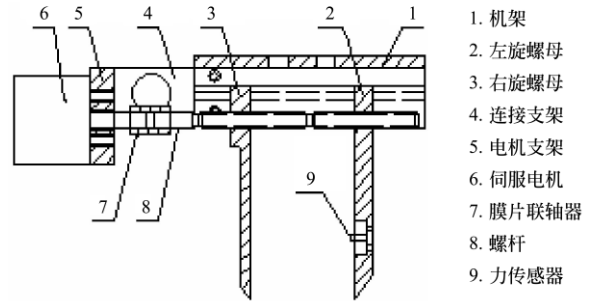


图 3 末端执行器装配图

Fig.3 Assembly drawing of end-effector

2 软件设计

在果蔬抓取系统中，采用 LabVIEW 作为软件开发平台，使用 G 图形化语言和库函数进行编程，开发了基于灰色预测 PI 力控制的果蔬抓取系统，抓取系统主程序界面如图 4 所示。主要子程序包括灰色预测控制算法、数据采集、伺服电机正反转、伺服电机停止、系统初始化模块等组成。研华公司数据采集卡、运动控制卡提供了相关支持 LabVIEW 的驱动程序，方便了数据采集和伺服电机的运动控制编程。

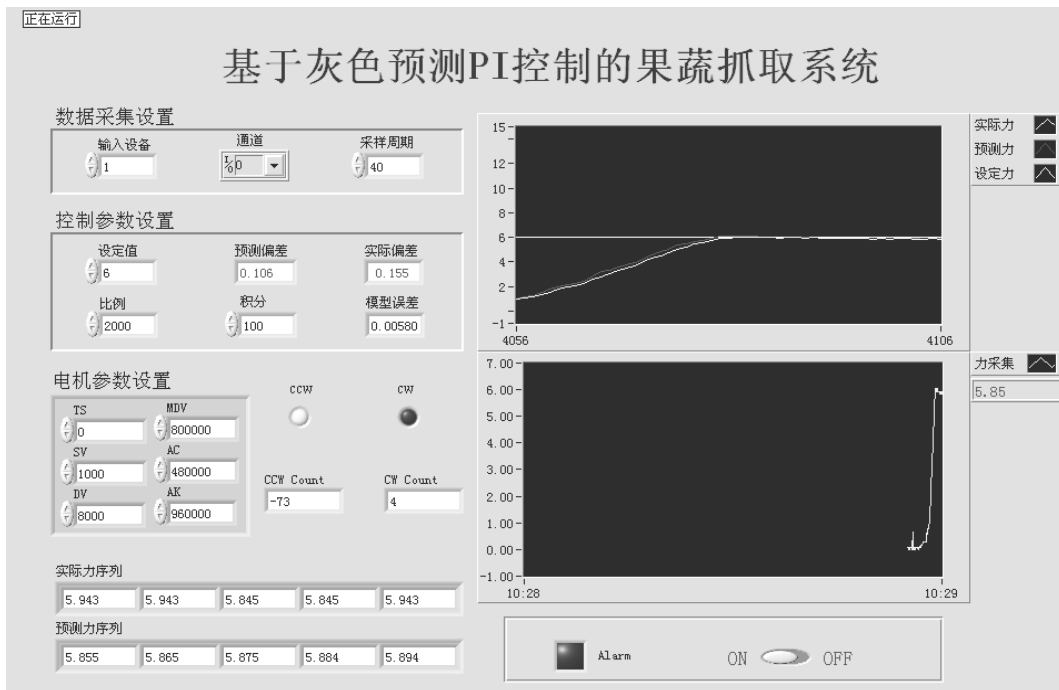


图 4 抓取系统主界面

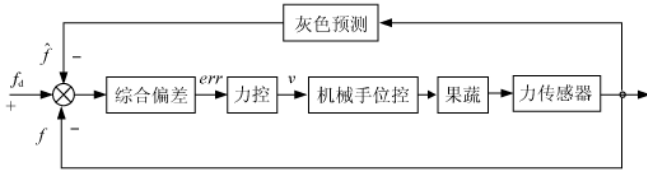
Fig.4 Main interface of grasping system

3 灰色预测增量 PI 力控制算法

提出的灰色预测增量 PI 力控制算法，如图 5 所示。力控制器的输入为综合力偏差 err ，输出为速度 v 。该控

制算法把力控制变成末端执行器的变速度控制。灰色预测方法由邓聚龙教授提出^[14-15]，只需几个数据就可以建立一个灰色模型。采用灰色预测的目的是可以提前预测果蔬受到的抓持力，根据预测力和当前实际力提前作出

决策, 使力控制器可以利用过去、当前和未来的果蔬抓持力信息来计算合适的控制校正量对抓持力偏差进行预补偿, 控制器可以获得超调量小和响应快速的特点。



注: f_d ——设定力; f ——抓取时实际采样力; \hat{f} ——灰色预测模型预测到的下一采样周期的抓持力; err ——综合力偏差; v ——输出速度

图 5 灰色预测控制框架图
Fig.5 Block of grey prediction control

3.1 灰色 GM(1,1) 预测算法及误差分析

给定原始数据序列向量为 $x^{(0)}$

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (2)$$

式中 n ——原始序列中的数据个数。

首先对原始数据序列进行一次累加生成 $x^{(1)}$, 目的是弱化原始数据的随机性和波动性

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (3)$$

式中: $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k=1, 2, \dots, n)$

1) 灰微分动态模型 GM(1,1) 的建立

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = u \quad (4)$$

式中: $z^{(1)}(k)$ ——为 $x^{(1)}(k)$ 的紧邻均生成, $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$; a ——模型发展系数; u ——灰色输入。

2) 构造矩阵 B 和数据向量 Y_n

$$\hat{a} = [a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (5)$$

$$Y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.5(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

式中 \hat{a} ——带辨识的参数列。

3) 计算发展系数 a 和灰色输入 u

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(z^{(1)}(2) & 1 \\ -(z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

4) 累加模型预测结果

方程 (4) 的解析解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - u/a)e^{-ak} + u/a \quad (7)$$

式中 $\hat{x}^{(1)}(k)$ ——灰微分方程的第 k 个解析值。

5) 还原后的预测结果

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (8)$$

式中 $\hat{x}^{(0)}(k)$ ——经累减还原后的第 k 个预测值。

得到含有下一个预测值的数据序列为

$$\hat{x}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n), \hat{x}^{(0)}(n+1)\} \quad (9)$$

6) 预测模型的平均相对误差

在原始数据序列公式 (2) 和含有预测值的还原数列中公式 (9) 中, 有

$$\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$$

将序列中的第一项 $\hat{x}^{(0)}(1)$ 和预测值 $\hat{x}^{(0)}(n+1)$ 除掉, 得到预测模型的平均相对误差为

$$\theta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)}{x^{(0)}(i)} \right| \quad (10)$$

式中: $x^{(0)}(i)$ 、 $\hat{x}^{(0)}(i)$ ($2 \leq i \leq n$)——原始数据序列及其模型还原数据值。

3.2 综合力偏差

灰色系统理论一般采用 3 种方法检验模型的精度, 即残差、关联度和后验差^[15]。本文采用平均相对误差作为检验模型精度的指标。根据图 5 可得

$$err_1(k) = f_d(k) - f(k) \quad (11)$$

$$err_2(k) = f_d(k) - \hat{f}(k+1) \quad (12)$$

式中: $f_d(k)$, $f(k)$, $\hat{f}(k+1)$ ——第 k 个采样时刻时的设定力值, 当前实际力值, 预测到的第 k+1 时刻的预测力值; $err_1(k)$, $err_2(k)$ ——第 k 个采样时刻的当前实际力偏差、超前一个采样时刻的预测力偏差。

根据公式 (10), 得到预测模型的平均相对误差

$$\theta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f^{(0)}(i) - \hat{f}^{(0)}(i)}{f^{(0)}(i)} \right| \quad (2 \leq i \leq n) \quad (13)$$

当平均相对误差 θ 越小时, 表明灰色模型精度越高, 相应的预测精度就越高。如果模型精度不高, 表明所采用的预测值就不可靠, 这时若还仅根据预测偏差来确定控制量, 实际上系统输出是达不到控制要求的, 甚至使控制系统失稳。因此, 必须考虑当前时刻的实际力偏差。本文采用的综合偏差为

$$err(k) = \theta err_1(k) + (1-\theta)err_2(k) \quad (14)$$

当模型精度越高时, 预测偏差占综合偏差的比重愈大, 控制器就可以具有预测系统未来行为的功能; 当模型预测误差很高时, 未来预测力不能使用, 当 $\theta \geq 1$ 时, 令 $\theta=1$ 。由公式 (14) 知, 综合力偏差等于实际力偏差, 见公式 (15)。

$$err(k) = \theta err_1(k) \quad (15)$$

在果蔬抓取控制中, 将实际力偏差和预测力偏差按某个权值结合起来形成综合力偏差, 当预测模型精度较高时或较低时, 相应地加大或减小预测力偏差在综合力偏差中的权值, 调整预测值在控制回路中的作用, 控制效果会更好。

3.3 等维新息灰色预测

采用等维新息模型^[15], 令公式 (2) 中的数据序列个数为 5。在每一个采样周期内 (步长), 首先通过 5 维实

际采集到的抓持力序列预测下一时刻的预测力 $\hat{f}(k+1)$ ，数据采集卡每采集到 1 个最新力数据，进入 5 维力序列的最右端，依次向左移位，替换掉最左端的老数据，同时预测下一采样时刻的预测力，实现在线滚动预测，如图 6 所示。由公式 (13) 可计算预测模型的平均相对误差 θ ，再结合当前最新实际力 $f(k)$ 和预测到的下一时刻的预测力值 $\hat{f}(k+1)$ ，就可由公式 (14) 计算当前进入力控制器的综合偏差 $err(k)$ 。

3.4 增量式 PI 控制

力控制器的输入为综合力偏差，见公式 (14)，力控制器生成位置控制系统所需的速度指令

$$v(k) = k_p(err(k) - err(k-1)) + k_i err(k) \quad (16)$$

式中： k_p 、 k_i ——力控制器的比例、积分增益系数； $v(k)$ ——力控制器的输出速度。

在未接触到果蔬时，末端执行器采用位置控制方式，末端执行器 2 个螺母夹持移动速度为

$$v_1 = lV / E \quad (17)$$

式中： l ——螺母、螺杆的导程， $l=1.25 \text{ mm}$ ； V ——设定的伺服电机脉冲速度； E ——伺服电机每转编码器脉冲数，这里 $E=10\ 000 \text{ P/R}$ ； V/E ——每秒伺服电机转动的圈数。

在接触并抓取果蔬的力控制过程中，末端执行器两螺母夹持果蔬的可变速度为

$$v_2 = lv(k) / E \quad (18)$$

随着抓持力的增大，力偏差愈来愈小，末端执行器将自减速停止运动。



注：数字 1~5——5 维力序列，1~4 为前 4 个采样时刻的实际力值，5 为当前最新实际力 $f(k)$ ；6*——根据 1~5 力序列所预测到的下一采样时刻的果蔬将受到的预测力 $\hat{f}(k+1)$ ；2^, 3^, 4^, 5^——预测模型经累减还原生成的数据

图 6 等维新息灰色预测

Fig.6 Equal dimension new information gray model

4 试验

该试验验证灰色预测增量式 PI 力控制算法在抓取部分变形果蔬的抓持效果。以葡萄和西红柿为抓持对象，分别对末端执行器采用开环控制、增量 PI 控制、灰色预测增量 PI 控制 3 种控制方式对比果蔬抓持力变化。在控制参数设置中，力信号的采样周期均为： $t_s=40 \text{ ms}$ ，抓持时间均为 $t=8 \text{ s}$ 。当末端执行器未夹持到葡萄和西红柿时，伺服电机驱动速度均设置为 $V=80\ 000 \text{ PPS}$ ，即末端执行器处于位置控制时 2 个螺母夹持移动速度为 $v_1=0.01 \text{ m/s}$ 。

4.1 葡萄抓持试验

在葡萄抓持试验中，抓取对象为成熟的巨峰葡萄，

质量为 12.8 g 。3 种控制方式中的设定力均为 $f_d=1 \text{ N}$ 。开环控制表示当末端执行器螺母板内嵌力传感器检测到抓持力等于设定力 1 N 时，末端执行器立即停止运动。图 7 中的点曲线表示由于葡萄的变形而导致的抓持力变化曲线，可以看出在末端执行器停止后，开环控制时抓持力有较大程度下降，约为设定力的 41.4% 。

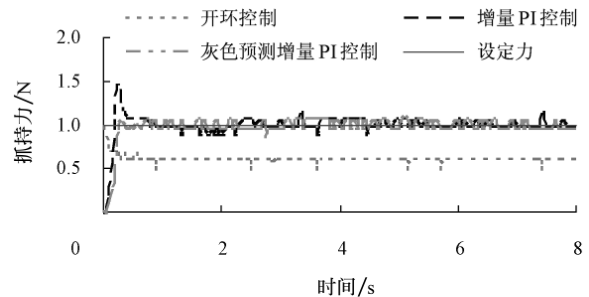


图 7 葡萄抓持试验

Fig.7 Grape grasping experiment

后 2 种控制方式均为力闭环控制，增量式 PI 和灰色预测增量 PI 力控制器增益系数设为 $k_p=5\ 000$ ， $k_i=3\ 000$ 。抓取时末端执行器均处于同一夹持位置。当力传感器检测到抓持力 $f>0.2 \text{ N}$ 时，进入力控制过程。由图 7 中的虚线可以看出，增量式 PI 控制方式使末端执行器抓持时出现较大的力超调，超调量约为 46.5% ，易抓损葡萄。由图 7 双点划线可以看出，灰色预测增量 PI 力控制可使末端执行器输出夹持力快速低超调地到达设定力，并使抓持力稳定在力设定值范围。

4.2 西红柿抓持试验

在西红柿抓持试验中，抓取对象为成熟的金棚 1 号番茄，质量为 183 g 。3 种控制方式中的设定力均为 $f_d=6 \text{ N}$ 。图 8 试验中的点曲线表示末端执行器开环控制时由于番茄的变形而导致的抓持力变化曲线，抓持力下降程度约为设定力的 30% 。

后 2 种控制方式 PI 力控制器的增益参数设为 $k_p=20\ 000$ ， $k_i=10\ 000$ 。当力传感器检测到抓持力 $f>0.2 \text{ N}$ 时，进入力控制过程。由图 8 试验中的虚线可以看出，增量式 PI 控制方式使末端执行器抓持力会缓慢趋于力设定值，上升时间约为 0.68 s 。由图 8 双点划线可以看出，预测增量 PI 控制能使末端执行器的输出夹持力快速低超调地到达设定力，上升时间约为 0.32 s 。

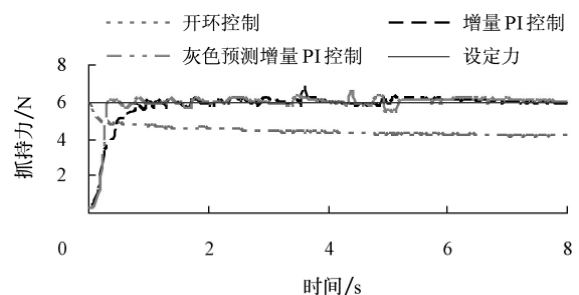


图 8 西红柿抓持试验

Fig.8 Tomato grasping experiment

在抓取或采摘果蔬时,应该考虑果蔬的变形对抓持力的影响,抓持力的变化会影响抓取果蔬的质量,过大的抓持力超调会损伤果蔬组织,由于变形导致的过小的抓持力则不能稳固抓取果蔬。

5 结 论

1) 利用末端执行器、交流电机、交流驱动器、运动控制卡、数据采集卡、力传感器、放大器、工控机等组成了开放式末端执行器抓取力控制系统,系统具有良好的扩展性、通用性和实用性。

2) 提出一种灰色预测增量 PI 力控制算法,通过采集果蔬受到的抓持力建立灰色预测模型,将实际力偏差和预测力偏差按某个权值结合起来形成综合力偏差,当预测模型精度较高时或较低时,相应地加大或减小预测力偏差在综合力偏差中的权值,使控制器对末端执行器和果蔬之间的动态抓持过程具有适应性。

3) 灰色预测 PI 力控制器可以利用过去、当前和未来的果蔬抓持力信息来计算合适的控制校正量对抓持力误差进行预补偿,可获得超调量小和响应快速的特点。

4) 灰色预测 PI 力控制算法可以快速稳定控制果蔬的抓持力,减小果蔬抓持损伤,也适合较软物体的抓取控制。

[参 考 文 献]

- [1] 徐丽明,张铁中. 果蔬果实收获机器人的研究现状及关键问题和对策[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 38—42.
Xu Liming; Zhang Tiezhong. Present situation of fruit and vegetable harvesting robot and its key problems and measures in application[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 38—42. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵匀,武传宇,胡旭东,等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 20—24.
Zhao Yun, Wu Chuanyu, Hu Xudong, et al. Research progress and problems of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [3] 方建军. 移动式采摘机器人研究现状与进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 273—278.
Fang Jianjun. Present situation and development of mobile harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 273—278. (in Chinese with English abstract)
- [4] 汤修映,张铁中. 果蔬收获机器人研究综述[J]. 机器人, 2005, 27(1): 90—96.
Tang Xiuying, Zhang Tiezhong. Robotics for fruit and vegetable harvesting: A review[J]. Robot, 2005, 27(1): 90—96. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 175—179.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):175—179. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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 with English abstract)
- [7] 王荣,焦群英,魏德强,等. 葡萄的力学特性及有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 7—10.
Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang, et al. Mechanical characteristics and the finite element analysis of grapes[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 7—10. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘继展,李萍萍,李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 66—70.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 66—70. (in Chinese with English abstract)
- [9] Hayashi S, Ganno K, Ishii Y, et al. Robotic harvesting system for eggplants[J]. JARQ, 2002, 36(3): 163—168.
- [10] van Henten E J, Hemming J, van Tuijl B A J, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses[J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241—258.
- [11] Flanagan J R, Bowman M C, Johansson R S. Control strategies in object manipulation tasks[J]. Current Opinion in Neurobiology, 2006, 16(6): 650—659.
- [12] Pedreño-Molina J, Guerrero-González A, Calabozo - Moran J, et al. A neural tactile architecture applied to real-time stiffness estimation for a large scale of robotic grasping systems[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2007, 49(4): 311—323..
- [13] Friedrich W, Lim P, Nicholls H. Sensory gripping system for variable products[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA:[s.n.], 2000.
- [14] Deng J L. Introduction to grey system theory[J]. Journal of grey system, 1989, 1(1): 1—24.
- [15] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

Design and experiment of fruit and vegetable grasping system based on grey prediction control

Wang Xuelin, Ji Changying^{*}, Zhou Jun, Jiang Li, Gu Baoxing

(Colleges of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Incremental PI (proportional integral) force control algorithm was proposed based on grey prediction for making grasp force track set value quickly with small overshoot between end-effector and deformable fruit and vegetable. Grey prediction model was built by the signal of grasp force acquired from the sensor, the weights of predictive force error were increased or decreased in integrated error accordingly to the precision of predictive model. Force controller could employ the past, present and future grasp force information to calculate an appropriate control correction to pre-compensate the force error, and could yield small overshoot, fast response simultaneously, so make the controller adaptive to the dynamic grasp process between fruit and end-effector. Experimental results demonstrated the efficacy of grey predictive incremental PI algorithm, which the damage of grasping fruit and vegetable could be decreased.

Key words: robots, force control, algorithms, grasping, grey prediction