

机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制

王学林¹, 肖永飞¹, 毕淑慧¹, 范新建¹, 饶洪辉²

(1. 山东省科学院自动化研究所, 山东省机器人与制造自动化技术重点实验室, 济南 250014;
2. 江西农业大学工学院, 南昌 330045)

摘要:为减小机器人在采摘过程中对果蔬的损伤, 设计了机器人柔性抓取试验平台, 提出了一种适合末端执行器双指抓取果蔬的抓持力跟踪阻抗控制算法, 该算法将末端执行器抓持果蔬系统等效为阻抗-导纳模型, 使手指力/位控制等效为期望的惯量-阻尼-刚度模型, 可按需调节其参数实现抓持力与位置的动态关系。期望抓持力与采集果蔬实际接触力的偏差作为外环力阻抗控制器的输入, 控制器生成对内部位置环参考轨迹的校正量。该算法仅考虑沿末端执行器双指夹持果蔬方向, 避免了使用多自由度机械臂阻抗控制算法的复杂性, 提高了控制的实时性, 同时对抓取系统模型的不确定和力扰动具有较强的鲁棒性。机器人抓取试验证明了双指抓持力反馈阻抗柔顺控制算法的有效性, 可实现机器人柔性抓取, 减小抓取果蔬损伤和保证品质。该研究可为农业机器人无损抓取和采摘提供关键技术。

关键词: 机器人; 末端执行器; 算法; 柔性抓取; 力控制; 阻抗控制; 采摘; 导纳控制

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.009

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-01-0058-06

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, 31(1): 58-63.

Wang Xuelin, Xiao Yongfei, Bi Shuhui, et al. Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 58-63. (in Chinese with English abstract)

0 引言

由于作业的复杂性和特殊性, 农业机器人抓取成功率低、损伤率高, 柔性抓取和夹持已成为相关机器人研究的关键技术。在减小果蔬抓取夹持损伤方面, 国内外许多学者已经进行了多方面研究: 在夹持器恒速模式下, 以果实粘弹性伯格斯特力学模型为基础, 建立了快速的果实夹持碰撞模型^[1]; 对末端执行器和电机分别建立控制模型, 开发一种基于广义比例积分的抓取力矩优化控制方法^[2]; 为使末端执行器和果蔬间的抓持力快速低超调地跟踪期望的设定力, 提出并试验了基于灰色预测的增量式PI力控制算法^[3]; 将末端执行器当前抓取力和滑觉传感器输出信号作为智能控制器的输入, 采用自适应神经模糊推理系统可自动调节对不同质量的果蔬抓取力大小^[4]。

在机器人末端执行器双指采摘番茄过程中, 探讨了电机电流、速度和番茄的双指抓取力、接触部位及番茄的损伤形变关系^[5]。另外, 气动肌肉柔性驱动技术也被用于软弱易碎等物体的抓取^[6-7]。上述抓取系统主要侧重于果实力学模型研究或末端执行器抓取的力力矩控制算法研究, 对末端执行器抓取果蔬整体系统研究不足。本文设计了柔性末端执行器, 构建了工业机器人自主抓取试验平台, 将末端执行器-果蔬整体抓取系统分别等效为期望的二阶阻抗-一阶导纳系统模型, 提出了基于笛卡尔空间末端执行器双指抓取果蔬的主动力跟踪阻抗控制算法, 以期实现果蔬的柔性抓取。

望的二阶阻抗-一阶导纳系统模型, 提出了基于笛卡尔空间末端执行器双指抓取果蔬的主动力跟踪阻抗控制算法, 以期实现果蔬的柔性抓取。

1 机器人柔性抓取系统设计

1.1 双驱末端执行器设计

相比夹持中心不变的传统双指执行器, 双驱动末端执行器具备机构和控制的灵活性^[8-9], 设计的末端执行器可实现夹持行程预编程设置, 双指可分别设置力、位置、速度等参数, 抓取灵活性提高, 使用故障率降低。最大设计外形尺寸为130 mm×60 mm×180 mm, 双指夹持行程设计范围为0~72 mm, 夹持力0~80 N。使用双同步带和双丝杠传动, 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, 具备自锁能力。如图1所示, 该末端执行器系统主要由双直流伺服电机、双电机端同步带轮、双定位微型滑动导轨、双微型滚珠丝杠、双丝杠同步带轮、双指、U型主机架、覆盖板及法兰等组成,

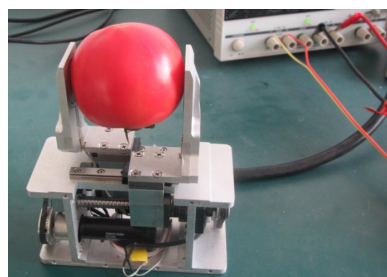


图1 末端执行器柔性抓取系统

Fig.1 Flexible grasping system of end-effector

收稿日期: 2014-09-10 修订日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305180、61203229); 山东省自然科学基金项目(ZR2013FM026、ZR2012FQ022、ZR2014YL009)

作者简介: 王学林, 男, 副研究员, 博士, 研究方向为机器人技术。济南 山东省科学院自动化研究所, 250014. Email: wxlwsj@163.com

双指从侧面通过螺钉连接安装，增加了拆卸和更换手爪的灵活度。整体结构设计简单、模块化零组件安装配置、易于加工、装配和拆卸，以特殊铝材为主，减少了外壳和组件质量，加强了抓取系统的动力和高效。

1.2 控制系统设计

该末端执行器、机器人与上位机控制示意图 2 所示。

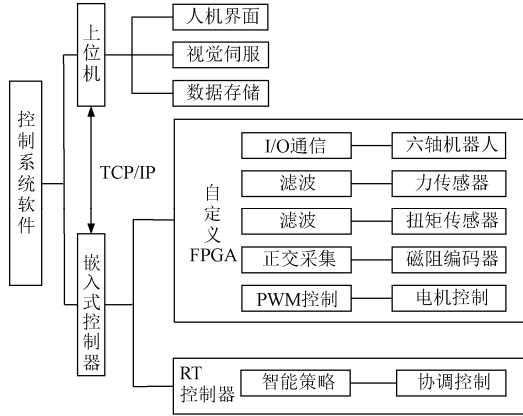


图 2 机器人控制系统组成框图

Fig.2 Composing of control system for robot

执行器控制系统由嵌入式控制器（NI-sbRIO9631，National Instruments Corporation），双直流伺服减速电机（MaxonRE16 6.5W+MR512，IMP+GP16A 29:1，瑞士 Maxon Motor），双直流伺服驱动器（SDA11，PWM，100~500 Hz，苏州钧和伺服科技公司），双薄膜 FSR 力传感器（FlexiForce A401，Interlink Electronics Inc），双触觉开关（Omron，D5B-501，日本欧姆龙公司）等组成。其中 NI-sbRIO9631 集成了实时处理器、可重新配置的现场可编程门阵列和 I/O，具有 266 MHz CPU，一百万门 FPGA，110 条数字 I/O 线，16 位分辨率通道，可满足多电机编码器正交采集、力信号滤波采集、触觉检测、数字 I/O 通信和多路脉冲宽度调变（pulse width modulation，PWM）输出等功能。系统开发软件为 LabVIEW Realtime、FPGA，其中直流电机 PWM 控制、正交编码算法、力信号采集及滤波、触觉信号采集、I/O 通信等部署在嵌入式控制器的 FPGA 层运行，主要控制算法在实时控制器上运行，并可通过 TCP/IP 网络协议的以太网与局域网计算机相连，并可传送、显示和保存相关运行数据。

对嵌入式控制器 FPGA 层数字 I/O 线编程，可实现用硬件电路采集直流伺服电机磁阻编码器 A、B、Z 相脉冲序列形式的电信号，使用正交编码算法，就可以同时获得旋转的位置和方向信息，每个手指移动量为：

$$s_i = pi_2 / x_4 ni i_3 \quad (1)$$

式中： s_i 为第 i 个手指位移，mm； p 为检测编码器脉冲总数； x_4 为 X4 编码类型算法； n 为电机旋转一周编码器所生成的脉冲数目（512 pulse/r）； i_1 为电机端到丝杠端的传动比（1:2）； i_2 为丝杠旋转一周所走的直线距离，补单位，取 2.5 mm/r； i_3 为直流伺服电机减速比，取 29:1。

直流伺服电机采用 PWM 调速控制，基于 NI-sbRIO 9631 控制器 FPGA 层硬件编程，部署多路数字 I/O 同时

发送多路 PWM 脉冲序列，频率为 500 Hz。选用的伺服电机额定速度为 12 100 r/min，即 202 r/s。其手指移动速度为：

$$v_i = i_2 v_R (100 d_i - 50) / 50 i_1 i_3 \quad (2)$$

式中： v_R 为电机额定速度，m/s； d_i 为第 i 个伺服电机占空比； v_i 为第 i 个手指速度，m/s。

1.3 力传感系统设计

力 FSR 传感器直径 25.4 mm，厚度 0.203 mm，柔性高，可贴在双指平面测量力和力变化速率。FSR 是一种随着有效表面上压力增大而输出阻值减小的高分子薄膜，在其信号地串接 $R_M=500$ K 电阻，使用的激励电源为恒压 5 V，采集力传感器阻值变化产生的相对电压变化，其公式为：

$$v_{out} = (v+) / (1 + r_{FSR} / r_M) \quad (3)$$

式中： $v+$ 为激励电源，+5 V； r_{FSR} 为传感器受压产生的电阻变化； v_{out} 为实测电压，单位为电压 v 。

力 FSR 传感器在使用前必须进行标定，标定后的曲线轨迹如图 3 所示，其实测电压与压力拟合公式为：

$$F = 0.292V^5 - 2.515V^4 + 8.463V^3 - 12.515V^2 + 9.415V - 2.403 \quad (4)$$

式中： F 为压力，N； V 为电压，V。

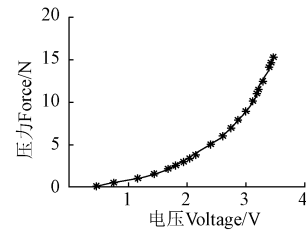


图 3 FSR 力传感器标定曲线

Fig.3 Force calibration curve of FSR sensor

2 机器人柔性抓取力控制策略

提出的末端执行器抓取力阻抗控制策略如图 4 示，由阻抗控制器外环和位置控制内环组成，两者组成串级控制结构。阻抗控制策略是一种实现机械臂与外界环境的主动柔顺方法^[10-11]，这里使用阻抗控制是以目标阻抗代替实际的末端执行器抓取动力学模型，将手指与抓取物体间的力偏差 e_f 作为目标阻抗的输入，参考位置 x_r 和力阻抗环生成的校正量 Δx_f 之和作为实时规划的动态位置指令 x_d ，作为内部位置环的输入， u_1 为伺服系统的输入指令，位置环使用增量式 PID 控制器，使位置输出跟踪校正后的期望位置，从而实现末端执行器期望的抓取动力学特性。

将末端执行器抓取果蔬等效为期望的二阶阻抗-一阶导纳模型，如图 5 所示。手指 a 采用位置控制模式，首先按事先指定的速度移动到指定位置处停止；手指 b 采用力跟踪阻抗控制策略，将手指力/位控制等效为期望的惯量-阻尼-刚度模型，可建立末端手指位移与夹持力的期望动态关系，实现滑动手指到固定手指的协调抓取。

2.3 位置增量式 PID 控制器

由于力阻抗控制器类似一个二阶低通滤波器，对 Δf 按采样间隔滤波，得到滤波后的位置修正量 Δx_f ，与参考位置量 x_r 相加，作为位置控制器输入 x_d ，见图 (4)，位置控制器生成电机及驱动系统所需的控制指令，由嵌入式控制器、伺服驱动及电机等系统构成对手指的位置控制，其增量式 PID 算法如下：

$$x(k) = x(k-1) + \Delta x(k) \quad (16)$$

$$\Delta x(k) = k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (17)$$

$$e(k) = x_d(k) - x(k) \quad (18)$$

$$x_d(k) = x_r(k) + \Delta x_f(k) \quad (19)$$

式中： $x(k)$ 、 $x(k-1)$ 为第 k 、 $(k-1)$ 次输出的位置控制值； $\Delta x(k)$ 为第 k 次输出增量值； $x_r(k)$ 为第 k 次采样时手指参考位移，m； k_p 、 k_i 、 k_d 为位置控制比例、积分、微分增益； $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 为第 k 、 $k-1$ 、 $k-2$ 次采样时偏差值； $x_d(k)$ 为位置控制器的期望输入。

3 机器人柔性抓取试验

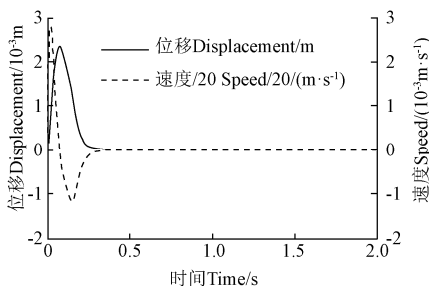
3.1 末端执行器抓取阻抗校正仿真

目的是测试末端执行器手指在参考位置稳定接触状态下，接触力发生改变后力阻抗控制器输出的手指位置和速度校正量仿真。以番茄抓取为例，手指抓取阻抗系统的主要参数设置如下： $m_d=1$ ， $b_d=100$ ， $k_d=2\ 000$ ， $k_{eq}=1\ 272.7\ \text{N/m}$ ， $f_d=8.01\ \text{N}$ ；试验中所选番茄的刚度约为 $k_e=3\ 500\ \text{N/m}$ 。以手指 b 为坐标起点，由式 (8)、式 (11) 得， $x_r=6.3 \times 10^{-3}\ \text{m}$ ， $x_e=4.0 \times 10^{-3}\ \text{m}$ 。设接触力 f_e 在参考位置 x_r 发生线性变化，符合式 (20) 的描述。基于 Matlab 软件在 $T_1=0.15\ \text{s}$ 、 $T=2\ \text{s}$ 内进行力阻抗控制器的数值仿真。

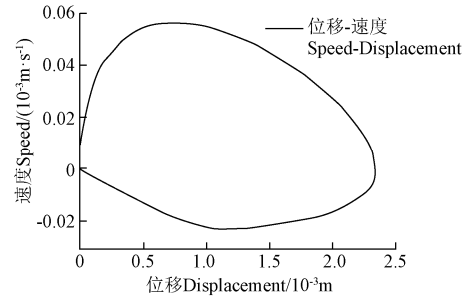
$$f_e = f_e(t) = \begin{cases} k_e t / T_1 & t \in [0, T_1] \\ f_d & t \in [T_1, T] \end{cases} \quad (20)$$

式中： T 为仿真时间 2 s； T_1 为接触力变化时间 0.15 s。

末端执行器在参考位置处的接触力发生改变所生成的位移和速度校正轨迹，如图 6a 所示，从仿真中可以看出接触力发生改变时手指可快速恢复到参考位置处，并且位置和速度变化平稳。以手指 b 位移为横坐标、速度为纵坐标构成的运动的相平面轨迹，如图 6b 所示，可直观准确地反映抓取系统的稳定性和运动形式，最后快速恢复到参考位置。



a. 末端执行器手指抓取位置和速度
a. Finger grasping displacement and speed



b. 末端执行器手指抓取相平面轨迹
b. Phase plane trajectory of grasping

图 6 末端执行器手指抓取位移、速度和相平面轨迹
Fig.6 Displacement, velocity and phase plane trajectory of grasping

3.2 机器人抓取试验

抓取试验现场如图 7 所示，将设计的末端执行器与 Fanuc M_10IA 型工业 6 轴机器人末端法兰装配，通过机器人与嵌入式控制器数字 I/O 双向通信，具备双指回零、张开及抓取等动作。



图 7 基于视觉的机器人末端执行器抓取力阻抗试验
Fig.7 Robotic end-effector impedance control based on vision

在机器人工作台上固定单目视觉系统 (Guppy PRO F-146B/C)，由视觉系统测量和规划手指、果蔬位置，采用本文作者提出的视觉模板匹配算法^[13]，机器人自主抓取步骤为：

1) 单目视觉固定在工作台上方，用标定模板实现视觉标定，将机器人示教到工作台标定模板中心，保持机器人末端执行器坐标系和图像坐标系在 Z 向重合一致，并尽量靠向工作台，机器人末端执行器始终垂直向下，记录机器人坐标值 O。

2) 在视觉标定区域内放置番茄、鸡蛋等物体，相对于标定模板中心，由视觉识别定位并实现物体的质心、长度等数据测量。

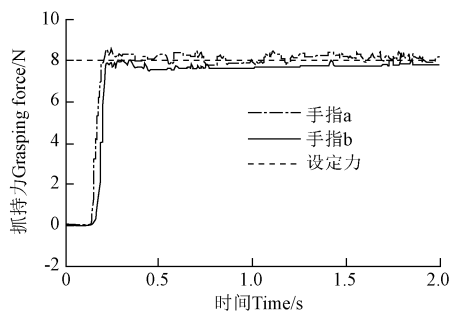
3) 相对于标定中心 O，将带抓物体的实际坐标偏移值，加上机器人 O 点坐标值，传给机器人基坐标系，由机器人 I/O 控制实现预先设定的速度到达该坐标值。

4) 由机器人定义的 I/O 控制末端执行器的动作，末端执行器一旦抓取牢固，将自动发送信号给机器人 I/O，实现操作。

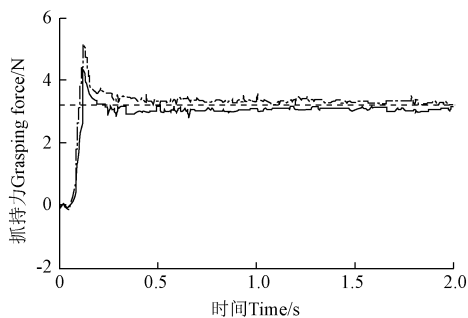
本试验以番茄和鸡蛋为抓取对象，验证抓持力跟踪阻抗控制算法在抓取较软、较硬物体的抓取效果。在控

制参数设置中,力控制采样间隔均为: $t_s=5\text{ ms}$, 抓持时间均为 $t=2\text{ s}$, 双指抓取物体时的起始速度均为 4.9 mm/s 。在 2 种力控制试验中, 抓取期望力分别为: 抓取西红柿 (129 g)、鸡蛋 (54 g) 需要的力分别设为 8.01 N (电压为 2.9 V , 由式 (4) 计算得, 下同) 和 3.18 N (2 V)。在番茄抓取中, 手指 b 采用的力目标阻抗控制参数同 3.1 小节的设置; 在鸡蛋抓取中, 手指 b 力目标阻抗控制参数设计为 $m_d=1$, $b_d=150$, $k_d=3\ 000$, $k_e=100\ 000$, $f_d=3.18\text{ N}$, $k_{eq}=2\ 912.6\text{ N/m}$, $x_r=1.09\times 10^{-3}\text{ m}$, $x_e=1.06\times 10^{-3}\text{ m}$ 。在 2 种力控制算法试验中, 通过网络共享变量可将抓取过程中的控制器上的数据传输至远程计算机显示和保存。

图 8 为机器人末端执行器抓取力阻抗控制试验。由图 8a 中双指夹持番茄力试验曲线可以看出, 采用的阻抗力控制算法可使双指夹持力快速低超调地跟踪期望的设定力, 随着夹持力偏差的减小, 机械手将自适应改变手指夹持位置, 确保对夹持力跟踪控制, 并稳定在设定范围内, 图 8a 试验过程中出现的最大力超调量为 13% , 系统上升时间为 0.04 s , 与期望设定力 8.01 V 相比, 双指抓取稳态误差最大范围为 $\pm 0.4\text{ N}$ 。



a. 西红柿抓持力阻抗控制试验
a. Force impedance control experiments with tomatoes



b. 鸡蛋抓持力阻抗控制试验
b. Force impedance control experiments with eggs

图 8 机器人末端执行器抓取力阻抗控制试验

Fig.8 Impedance control of grasping force test for robot end-effector

图 8b 为双指抓取鸡蛋夹持力试验曲线, 在抓取较硬的物体时, 提出的末端执行器阻抗控制算法仍可以协调控制手指与物体间的位置和力, 获得所需要的控制效果, 图 8b 试验过程中出现的最大超调量为 62% , 控制系统上升时间为 0.02 s , 与期望设定力 3.18 V 相比, 双指抓取稳态误差最大范围为 $\pm 0.3\text{ N}$ 。根据设计的抓取阻抗-导纳系统模型, 使用力跟踪阻抗控制算法可使末端执行器输出

力快速低超调地跟踪期望的设定力, 并可使力稳定在接受的范围内, 实现柔性抓取。

4 结论

本文设计了机器人柔性末端执行器抓持系统, 实现了双指夹持中心预编程设置, 采用双电机控制, 具备机构和控制的灵活性, 适合复杂环境下的柔性抓取或采摘, 构建了基于嵌入式控制器的工业机器人柔性抓取和采摘力控制试验平台, 实现了基于视觉和力觉的自主抓取试验。

基于笛卡尔空间末端执行器双指抓持方向, 提出了一种适合末端执行器双指抓取果蔬的接触力跟踪阻抗控制算法, 将末端执行器抓取果蔬之间的力/位控制等效为预设计的抓取二阶阻抗--一阶导纳模型, 即等效惯量-阻尼-刚度-刚度模型, 对果蔬刚度估计模型引起的误差可由力反馈阻抗控制器来校正, 该控制算法对物体模型的不确定和力扰动具有较强的适应性, 可以快速低超调地控制抓持力, 实现机器人柔性抓取, 减小对果蔬抓取损伤和保证品质。

[参考文献]

- [1] 刘继展, 白欣欣, 李萍萍, 等. 果实快速夹持复合碰撞模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 49-54.
Liu Jizhan, Bai Xinxin, Li Pingping. Complex collision model in high-speed gripping of fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 49-54. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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, 30(9): 19-26.
Ji Wei, Luo Dawei, Li Junle, et al. Compliance grasp force control for end-effector of fruit-vegetable picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 19-26. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 112-117. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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, 45(7): 67-72.
Zhou Jun, Yang Xiaorong, Zhu Shuping. Gripping force control using adaptive neuro-fuzzy inference systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 67-72. (in Chinese with English abstract)
- [5] Li ZhiGuo, Liu JiZhan, Li PingPing. Study on the collision-mechanical properties of tomatoes gripped by harvesting robot fingers[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(24): 7000-7007.
- [6] 鲍官军, 张水波, 陈亮, 等. 基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 242-246.

- Bao Guanjun, Zhang Shuibo, Chen Liang, et al. Design of spherical fruit end-grasper based on FPA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 45(5): 242—246. (in Chinese with English abstract)
- [7] Shuichi W, Koichi S, Keiko O. Miniature pneumatic curling rubber actuator generating bidirectional motion with one air-supply tube[J]. Advanced Robotics, 2011, 25(9/10): 1311—1330.
- [8] Morris D M, Hebbbar R, Newman W S. Force guided assemblies using a novel parallel manipulator[C]// Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on, 2011: 325—330.
- [9] Rabenorosoa K, Clévy C, Lutz P. Active force control for robotic micro-assembly: Application to guiding tasks[C]// Robotics and Automation 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 2137—2142.
- [10] Huang S, Liu Yuchi, Hsiang S. Robotic end-effector impedance control without expensive torque/force sensor[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 2013, 7(7): 516—523.
- [11] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulator: Part I-III[J]. Transactions of American Society of Mechanical Engineers, Journal of Dynamic System, Measure Control, 1985, 107(1): 1—24.
- [12] 杨振. 机器人阻抗控制算法的参数调整研究[J]. 枣庄学院学报, 2008, 25(2): 89—93.
Yang Zhen. An research on the adjustment of parameters of robot based on the impedance control[J]. Journal of Zaozhuang University, 2008, 25(2): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [13] Fan Xinjian, Wang Xuelin, Xiao Yongfei. A combined 2D-3D vision system for automatic robot picking[C]// Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Kumamoto, Japan, 2014: 513—516.

Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control

Wang Xuelin¹, Xiao Yongfei¹, Bi Shuhui¹, Fan Xinjian¹, Rao Honghui²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Robot and Manufacturing Automation Technology, Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014; 2. School of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: One of the major challenges of agricultural robots is the grasping and picking fresh fruit and vegetable without any damage under the complex environment. In order to minimize the harm due to robot grasp, this paper mainly introduces a dexterous multisensory gripper design and also develops a new force impedance control algorithm. First, the gripper with dual motor drive was designed, and each of fingers had an independent servo drive system and was integrated with force and tactile sensors. The calibration force sensors were mounted at the root of each finger, and the force signals were obtained by the force sensors. The expected force, position and speed parameters of the fingers can be set separately, so the grip centre and stroke can be controlled for the finger by pre-programming, the movement and forces of grasped objects can be actively controlled to achieve through the two-finger operations. The gripper with both the mechanical mechanism and control flexibility was mounted in the end of the industrial robot. The grasping experiment platform composed of industrial robot and dexterous gripper integrated monocular vision, force sensing and many kinds of sensors. The 2-D vision was able to quickly detect and locate grasped objects at the top of the experiment platform. Second, a force impedance control algorithm was proposed and used for one of fingers, position control was used for another finger, and it can regulate the grasping force by defining the target impedance between desired position and contact force. The whole grasping system can be equivalent to impedance & admittance model, and the finger force/position control can be equivalent to the expected target inertia-damping-stiffness model, and the model parameters can be adjustable according to the needs to realize the dynamic relationship between grasping force and position. The contact force errors between expected force value and actual force acquired from the force sensor were as the input of impedance controller and its output can be realized by the reference trajectory correction to the internal position control loop. The proposed algorithm only considered the direction of gripping fruit and vegetable, and the reference trajectory can be determined simply, and then avoids the use of complicated impedance control for multi-degree of freedom manipulators, through which it can improve the real-time control and robustness of the grasping system with model uncertainty or external force disturbance. Robot grasping experiments show that the system runs smoothly and reliably, the force-feedback impedance control is very effective, and the steady state error is maximum range within $\pm 0.4\text{N}$ in the experiment of grasping the tomatoes and eggs. It can make force track value with small force overshoot and fast response simultaneously between the end-effector and fruit and vegetable, so it makes the force controller adaptive to the dynamic grasp process between the end-effector and fruit and vegetable, it can realize the flexible grasping and reduce damages and ensure the quality of the grasped fruit and vegetable. The research provides a key control technology for the compliant grasping of fruit and vegetable.

Key words: robots; end effectors; algorithms; flexible grasping; force control; impedance control; picking; admittance control