

基于力/力矩信息的面向位控机器人的阻抗控制

李二超, 李战明

(兰州理工大学 电气与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为了克服末端接触点距离力传感器中心较远时, 力传感器测量实际接触力的局限性, 分析实际作用力与测量力/力矩值之间的关系, 利用力传感器信息或力矩信息得到位置控制方向和力控制方向. 根据位控与力控方向对机器人末端进行参考轨迹规划, 在阻抗控制律中应用参考比例因子调节参考轨迹. 基于力误差信息通过模糊推理调节参考比例因子的大小, 使生成的参考轨迹适应未知表面的变化. 实验结果表明, 所提出的控制方法能实现未知工件表面的恒力跟踪.

关键词: 位控机器人; 阻抗控制; 模糊推理; 未知环境

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Impedance control for positional-controlled robotic manipulators based on force/torque information

LI Er-chao, LI Zhan-ming

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China.

Correspondent: LI Er-chao, E-mail: lecstarr@163.com)

Abstract: In order to overcome the limitation of the force sensor to measure the actual contact force, when the end point of contact force is far from the force center, the relationship between the actual force and the measure force is analyzed and derived, force information or torque information is used respectively to estimate the force control and position control direction, and the estimated vectors are used to generate the virtual reference trajectory. The reference scaling factor is developed to tune the reference trajectory, and the reference scaling factor is determined by fuzzy reasoning in accordance to the information feedback on forces in contact. Experimental result shows its force tracking capability.

Keywords: positional-controlled robotic manipulators; impedance control; fuzzy inference; unknown environment

0 引言

在许多工业机器人的应用场合, 例如利用机器人进行精密装配、工件表面打磨、擦洗等, 需要在机械手与工件表面接触的同时产生相对运动, 并且需要对工件表面施加给定的接触力^[1-2].

目前正在使用的大多数工业机器人的位置精度很高, 但一般不具备接触力控制能力, 限制了机器人的应用领域, 因此, 研究适用于位控机器人的力控制策略具有很大的实用性^[3]. 但由于工业机器人内部控制系统一般对用户不开放, 研究工作应充分利用高精度机器人的位置伺服能力.

当机器人末端接触的环境表面约束关系未知时,

须通过力传感信息、视觉传感信息等手段估算未知环境的约束关系^[4-6]. 综合而言, 在利用力传感器获取的信息来估算未知轮廓的约束关系时, 研究者只考虑了力信息, 并且大多数约束表面模型只考虑力传感器和机器人终端在同一平面的情形. 实际上, 利用力传感器测量机器人终端实际受力时, 存在两种情况: 当终端接触点距离力传感器中心较远时, 力传感器测量的力信息不能真实反应作用力^[7], 需通过测量力矩计算终端实际接触作用力; 当终端接触点距离力传感器中心很近时, 可以直接通过力信息得到终端实际接触作用力^[8].

本文将对这些情况进行综合考虑, 并在此基础上

收稿日期: 2015-03-22; **修回日期:** 2015-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403175); 甘肃省财政厅高校科研业务费项目(2014); 甘肃省高等学校科研项目(2013A-031); 兰州理工大学红柳青年项目(Q201210).

作者简介: 李二超(1980-), 男, 副教授, 博士, 从事机器人智能控制、机器视觉等研究; 李战明(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器视觉等研究.

实现阻抗控制策略. 此方案不需要机器人的精确模型和约束环境的详细几何信息, 利用力传感器信息或力矩信息得到位置控制方向和接触力控制方向, 根据位控方向和力控方向对机器人终端进行参考轨迹规划, 并采用阻抗控制律使机器人获得较好的柔顺性, 以实现未知工件表面边缘跟踪和接触力的控制.

1 未知约束在线估计

机器人终端与工件表面发生接触的主要表现形式就是接触力, 若能利用力传感信息估计未知环境的约束关系, 在线得到位置控制和力控制方向, 则可实现机器人柔顺控制.

图1为机器人末端在未知环境约束下的接触力测量分析.

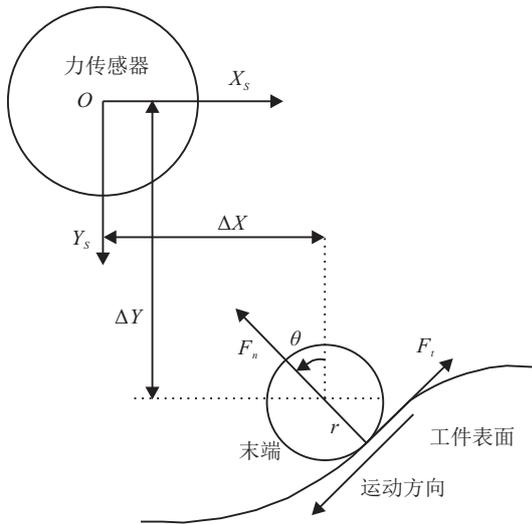


图1 边缘跟踪时的受力情况

在图1中: F_t 、 F_n 分别为接触点处末端所受的切向接触力和法向接触力, 工具末端半径为 r , F_n 与 Y_s 轴反向的夹角为 θ . 控制任务是: 以恒定的速度 v 沿工件表面切向运动, 在法线方向上施加给定的正压力 F_d . 一般情况下, 工具末端安装后与力传感器平行, 设工具末端在力传感器坐标系 $\{S\}$ 下偏移的位移为 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$. 假设只存在如图1所示的平面内运动, 则有关系

$$\tau_x = -(F_n \cdot \cos \theta + F_t \cdot \sin \theta) \cdot \Delta Z, \quad (1)$$

$$\tau_y = (F_n \cdot \sin \theta - F_t \cdot \cos \theta) \cdot \Delta Z, \quad (2)$$

$$\tau_z = -(F_n \cdot \sin \theta - F_t \cdot \cos \theta) \cdot (\Delta Y + r \cdot \cos \theta) + (F_n \cdot \cos \theta + F_t \cdot \sin \theta) \cdot (\Delta X + r \cdot \sin \theta). \quad (3)$$

其中: τ_x 、 τ_y 、 τ_z 为力传感器测得的力矩信息, 力传感器测得的3个力矩分量均含有法向接触力 F_n , 切向接触力 F_t 以及夹角 θ , 可解得 F_n 、 F_t 和 θ , 即可确定接触点处的单位切向量 k_t 和法向量 k_n , 求出的 k_t 、 k_n 可用于在线规划力/位混合控制运动轨迹, 即

$$k_t = [\cos \theta, \sin \theta, 0], \quad k_n = [\sin \theta, -\cos \theta, 0]. \quad (4)$$

文献[9]虽然也得到了 k_t 、 k_n , 但文中需要获得终端与环境之间的摩擦系数, 考虑摩擦力会使系统分析变得复杂, 而且难以建模, 适应环境不确定性的能力会降低.

2 阻抗力控制

阻抗控制就是通过调节用户给定的目标阻抗模型使机器人终端实现柔顺运动. 常用的目标阻抗模型如下:

$$E_f = M_m(\ddot{X} - \ddot{X}_r) + D_m(\dot{X} - \dot{X}_r) + K_m(X - X_r). \quad (5)$$

其中: M_m 、 D_m 、 K_m 分别为目标阻抗模型的惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; X 、 X_r 分别为机器人终端的实际运动轨迹和参考轨迹; $E_f = F_d - F$ 为接触力误差, F 为终端对工件表面的作用力, F_d 为接触力的设定值, 通常为恒值.

当机器人终端与工件表面接触时, 如果环境刚度 k_e 和环境位置 x_e 已知, 则机器人力控制会非常简单, 只要让机器人终端沿轨迹 $x = x_e + F/k_e$ 运动即可^[10]. 但是, 当机器人末端与未知环境接触时, 很难事先对其位置轨迹进行规划, 必须实时估计出位控方向, 然后在此方向上进行位置控制, 同时在与位控方向正交的方向进行力控制. 在式(5)中, M_m 、 D_m 、 K_m 是事先设计好的, E_f 可以由力传感器获得, 在未知环境下, X_r 必须通过在线估计的方法得到, 然后将 X_r 、 E_f 代入式(5)产生运动序列. 考虑位置控制方向移动速度, 采用下式生成参考运动轨迹 X_r :

$$X_r(k) = X(k-1) + \frac{F_d - F(k)}{k_e} k_n(k) + (VT)k_t(k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (6)$$

其中: k 为采样时刻, T 为采样时间, k_t 和 k_n 分别为单位切向量和单位法向量.

式(6)与文献[9]中的参考运动轨迹不同, 式(6)中的 $X(k-1)$ 为前一采样时刻接触点位置, 而并未采用上一控制周期的参考位置 $X_r(k-1)$, 主要是为了避免误差的积累. 根据式(6)生成参考运动轨迹, 需要事先知道准确的环境刚度 k_e , 如果 k_e 未知, 则一般可以采用自适应或学习的方法来弥补机器人对环境理解的不足, 可以通过在小范围约束环境内的学习获得力控制所要的环境刚度, 然后将学得的环境刚度用于全约束环境范围内的柔顺作业控制^[11].

式(6)虽然能够实现受限表面力跟踪, 且对位置偏差有一定抑制能力, 但检测得到的位置信息和力信息直接参与运算, 它们的检测信号精度直接影响接触

力的控制效果, 尤其是当环境刚度未知时, 参考轨迹易抖动, 严重时, 甚至损坏机器人终端及受限表面. 为了弥补存在环境不确定性时的不足, 在式(6)的基础上建立模糊调节参考轨迹, 即

$$X_r(k) = X(k-1) + \frac{F_d - F(k)}{k_e} k_n(k) + (VT)k_t(k) + \gamma(k) \cdot \Delta X_r(k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

其中: $\Delta X_r(k)$ 为参考轨迹调整量的变化范围, 假设 e_{pn} 为法线方向上的位置误差, 则

$$\Delta X_r(k) = \frac{F_d(k-1)e_{pn}(k-1)}{F_n(k-1)} - \frac{F_d(k-2)e_{pn}(k-2)}{F_n(k-2)} \quad (8)$$

引入参考比例因子 $\gamma(k) \in [0, 1]$, 其大小由模糊推理来调节, $\gamma(k)$ 的取值和选择请参见文献[11].

3 实验研究

为了验证上述法向在线估计算法及所提出的阻抗控制策略的有效性, 在 Adept-3 机器人上进行未知工件表面的恒力跟踪实验, 机器人的控制参数见文献[12].

本系统中, 在每个采样周期内采用相同的参考轨迹调整量, 即

$$\Delta X_r(k) = [-3 \times 10^{-4}, 3 \times 10^{-4}]$$

实验时, 假定工件表面参数未知, 根据力传感器的信息实时估计 F_n 与 Y_s 轴反向的夹角 θ 的值, 从而实时估计出机器人末端所在工件表面当前时刻的法向和切向, 再分别对法向进行力控制, 切向进行速度控制, 实现未知工件表面的力跟踪.

设置期望跟踪力为 30N, 利用力/力矩信息进行环境法向估计, 采用式(7)所提出的控制律, 工件的二维图形如图2中实线所示, 实际曲线表达式为 $y = -0.007x^2 + 0.7x - 5$, 使用编码器对实际的跟踪曲线返回的数值利用 Matlab 拟合, 得到 $y = -0.0069x^2 + 0.71x - 6$, 如图2中虚线所示, 可以看出图2的曲线拟合效果较好.

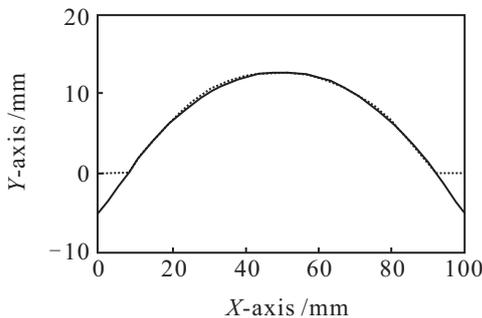


图2 工件表面的拟合曲线与实际曲线

随着恒力跟踪实验的进行, 实验过程中法向接触力跟踪如图3所示. 从图3中可以看出, 工具末端未与工件脱离接触, 接触力也一直在 30 ± 4 N 的范围之内, 控制效果较好.

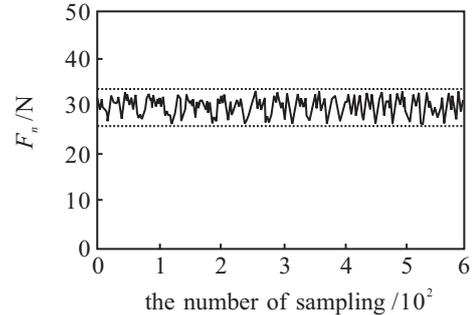


图3 采用式(7)的恒力跟踪法向接触力

为了进行对比, 仍令期望法向接触力为 30N, 采用文献[9]中的式(6)进行未知法向接触力跟踪, 如图4所示.

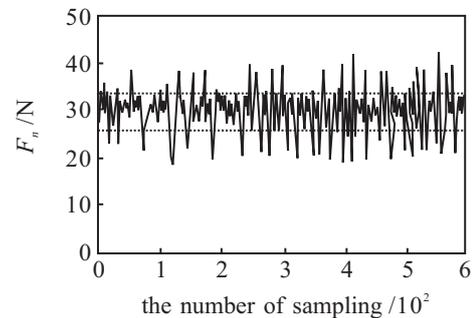


图4 采用式(6)的恒力跟踪法向接触力

由图3和图4可知, 采用式(7)的恒力跟踪与采用式(6)的恒力跟踪相比, 采用模糊调整参考轨迹的法向接触力的波动范围较小, 接触点作用力均处于 30 ± 4 N 的范围之内, 控制效果较好.

4 结论

本文分析了一定条件下在未知环境利用力/力矩信息估计工件表面法向的计算方法. 切向位置控制采用恒定速度, 根据位控方向和力控方向对机器人终端进行参考运动轨迹规划, 采用阻抗控制律使机器人获得较好的柔顺性, 本文所提出的控制策略可使实验过程中的接触力波动范围在 ± 4 N 范围内, 大大减少了接触力超出理想变化范围的点, 仿真实验验证了所提出方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] Kiguchi, Kazuo, Watanabe. Two-stage adaptive robot position/force control using fuzzy reasoning and neural networks[J]. Advanced Robotics, 2000, 14(3): 153-168.
- [2] Joo E M, Yang G. Robust adaptive control of robot manipulators using generalized fuzzy neural networks[J].

- IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(6): 620-628.
- [3] 蒋再男, 刘宏, 黄剑斌, 等. 基于阻抗内环的新型力外环控制策略[J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1515-1520.
(Jiang Z N, Liu H, Huang J B, et al. Novel explicit force control strategy based on impedance inner control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(8): 1515-1520.)
- [4] Wang Junping, Cho Hyungsuck. Micropeg and hole alignment using image moments based visual servoing method[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1286-1294.
- [5] Goncalves P. Uncalibrated eye-to-hand visual servoing using inverse fuzzy models[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2008, 16(2): 341-353.
- [6] Nagata F, Hase T, Haga Z, et al. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot[J]. Mechatronics, 2007, 17(415): 207-216.
- [7] 林君健. 基于力传感器的工业机器人主动柔顺装配系统研究[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2013.
(Lin J J. Research in active compliant assembly system for industrial robot with force sense[D]. Guangzhou: School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, 2013.)
- [8] 柳洪义, 王磊, 王菲. 基于智能预测的力/位混合控制方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(12): 1365-1368.
(Liu H Y, Wang L, Wang F. Hybrid position/force control based on intelligent prediction[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2006, 27(12): 1365-1368.)
- [9] 乔兵, 吴洪涛, 朱剑英, 等. 面向位控机器人的力/位混合控制[J]. 机器人, 1999, 21(3): 217-222.
(Qiao B, Wu H T, Zhu J Y, et al. Hybrid force position control for position-controlled robotic manipulators[J]. Robot, 1999, 21(3): 217-222.)
- [10] 王磊, 柳洪义. 面向未知环境基于智能预测的模糊控制器研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(1): 38-42.
(Wang L, Liu H Y. Fuzzy controller based on intelligent prediction in unknown environment[J]. Information and Control, 2006, 35(1): 38-42.)
- [11] 李二超, 李炜. 在未知环境下面向位控机器人的力/位混合控制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 657-660.
(Li E C, Li W. Hybrid force/position control for positional-controlled robotic manipulators in unknown environment[J]. J of China Coal Society, 2007, 32(6): 657-660.)
- [12] 乔兵. 智能机器人主动学习控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 1999.
(Qiao B. Intelligent robot active learning position/force control research[D]. Nanjing: Electrical and Mechanical College, University of Aeronautics & Astronautics, 1999.)
- (责任编辑: 闫 妍)