

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0449

机械臂在未知环境下基于力/位/阻抗的多交互控制

段星光¹, 韩定强¹, 马晓东², 李建玺¹, 崔腾飞¹, 马安稷¹

(1. 北京理工大学智能机器人研究所智能机器人与系统高精尖创新中心, 北京 100081; 2. 中国人民解放军总医院神经外科, 北京 100853)

摘要: 针对人一机械臂交互的不确定性以及环境的未知性, 提出了一种基于速度控制的方法来研究人、机械臂和环境三者之间的交互问题. 首先通过在机械臂末端安装 2 个 6 维力传感器来实现交互力的检测, 并在末端工具连接处增加单自由度柔性环节来实现机械臂的柔顺性. 其次, 基于 iTaSC (instantaneous task specification using constraints) 方法对机械臂与工具系统的柔顺度建模, 在输出空间中建立起速度/位置与力的关系, 实现机械臂与环境之间接触力的控制, 通过刚度矩阵实现人对机械臂的拖动控制. 另外结合力/位/阻抗混合控制方法实现了在安全区域约束下人拖动机械臂来完成一系列基于位置/力的任务, 并与未知环境之间达到一个良好的交互. 最后将提出的算法在 UR5 机械臂上进行轮廓跟踪任务的验证, 实验结果表明该方法能达到一个较好的交互控制效果.

关键词: 交互控制; 柔顺度; 力/位/阻抗控制; 轮廓跟踪

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-04-0449-09

Multi-Interaction Control for Manipulators in Unknown Environments Based on Hybrid Position-Impedance-Force Control

DUAN Xingguang¹, HAN Dingqiang¹, MA Xiaodong², LI Jianxi¹, CUI Tengfei¹, MA Anji¹

(1. Intelligent Robotics Institute & Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Neurosurgical Department, General Hospital of Chinese PLA, Beijing 100853, China)

Abstract: For the uncertainty of human-manipulator interaction and the unknown environment, a velocity control based scheme is developed to study the interaction among the human, the manipulator and the environment. Firstly, two 6-dimension force sensors are mounted at the end-effector of the manipulator to measure the interaction forces, and a compliant link with single DOF (degree of freedom) is added at the tool connection to achieve the compliance of the manipulator. Secondly, the compliance of the manipulator and the tool is modeled based on iTaSC (instantaneous task specification using constraints), so as to relate forces and position/velocities in the output space and realize the contact force control between the manipulator and the environment, and the stiffness matrix is adopted to drag the manipulator by an operator. Through the hybrid force-position-impedance control, the operator can drag the manipulator to complete a series of position/force tasks and interact with the unknown environment under the constraint of the safety area. Finally, the proposed algorithm is tested on a UR5 platform to complete the contour tracking task, which confirms that the proposed approach can implement good interaction control.

Keywords: interaction control; compliance; position-impedance-force control; contour tracking

1 引言 (Introduction)

传统的应用于工业生产的机械臂为了保证安全, 往往将其限定在特定的区域内, 从而防止与人发生碰撞. 随着人机协作机械臂的兴起, 机械臂的应用场景已从围栏中走出来, 人和机械臂的交互控制^[1-2]以及机械臂和环境之间的交互控制^[3-4]逐渐成为当前的研究热点. 然而, 之前大多数的研究都将人一机械臂—环境这三者之间的交互控制单独开来研究, 尚未考虑到三者之间的交互控制问题.

本文重点研究人一机械臂—环境三者之间多方面的交互控制, 从而使人机协作变得更加高效、安全.

人和机械臂的交互控制主要体现在机械臂的逆向驱动上^[5], 即机械臂能对外界施加的力做出相应的运动. 目前实现机械臂逆向驱动的方式有以下几种: (1) 通过检测电机的电流突变来实现, 但该方式需要相对精确的机械臂动力学模型和关节的摩擦力补偿, 对于轻型机械臂 (惯性小, 关节摩擦力小) 一般可采用该方法, 如巴瑞特全丝传动机械臂能达

到较好的交互控制效果^[6],但对于传统结构的机械臂效果较差。(2)在每个关节增加扭矩传感器^[7],直接避开对减速器、电机转子的建模,可以精确地检测关节力矩,效果较好,但是成本较高。(3)另外,最近也有一些研究仅仅使用电机编码器实现了机械臂的逆向驱动^[8-9];以上几种实现交互操作的方式多用于拖动示教或者碰撞检测,但当末端负载变化时,负载对机械臂施加的力和人对机械臂施加的力直接耦合在一起,无法分辨,因此应用场景比较受限制。(4)文[10]通过在机械臂末端安装力传感器的方式实现了协同作业中机械臂对操作力的放大,但该文只实现了单个自由度的控制,对于交互也仅仅实现了简单的接触力控制,其控制方法的通用性有待进一步提高。

机械臂和环境的交互控制与机械臂和人的交互控制存在许多共同点,它们都需要对施加的力做出运动调整,当前的研究主要集中于交互力对环境的作用^[11]。当环境未知时^[12],如果接触力可以被检测,则接触面的法向信息可被收集,从而可以控制机械臂在未知环境中做出相应的运动。

本文通过在机械臂末端安装2个力传感器来实现交互力信息的采集,基于iTASC控制框架建立了交互模型,并求解整个系统的柔顺度,从而建立起速度/位置和力的关系。另外,结合力/位/阻抗混合控制方法,使机械臂在人的直接控制下能完成与未知环境的交互,并且能在移动的过程中和环境保持一定大小的接触力。最后在UR5平台上验证了该算法的有效性。

2 系统总述 (System overview)

交互控制需要考虑到整个系统的安全性,包括人机交互以及机械臂和环境交互这两方面。本研究的实验平台采用了UR5机械臂,其本身具有较好的安全性,可以通过检测电流来防止对人体造成碰撞伤害。机械臂可以在人手操作力的引导下运动,不受末端负载变化的影响,因此采用了在机械臂末端安装6维力传感器的方式来实现逆向驱动。对于机械臂与未知环境的接触力也需要通过传感器来检测,而且2个力需要单独进行检测,利用1个力传感器难以实现2个力的解耦。因此,采用2个力传感器轴线互相垂直的安装方式(图1)来解决末端安装空间有限的问题。

机械臂与环境交互的安全性体现在接触力控制以及位置控制两方面,一般对于位置控制需要较高的精度,因此整个系统需要有较高的刚度,然而增

大刚度必然会导致力控制难度的增加。柔性末端往往更容易实现力控制,因此系统适当的柔性能提高其安全性。本文中在末端工具与力传感器的连接处增加了适当的柔性环节(如图1所示,只能在一个方向上变形),在保证系统位置控制精度的前提下提高了力交互的安全性。

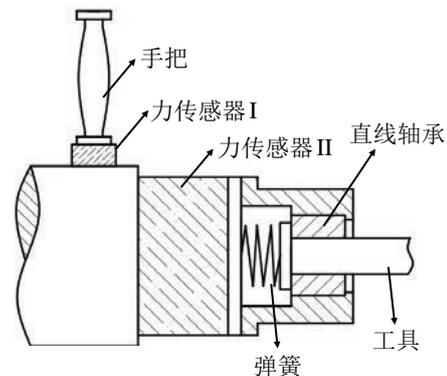


图1 末端结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the end structure

另外,交互控制一般限于低速的状态,而且机械臂末端具有一定的柔顺性,因此需要考虑模型的静力学(位置、速度以及交互力的大小),从而建立起力和速度之间的关系。

3 交互控制建模 (Modeling of interaction control)

3.1 iTASC 控制框架

本文提出的交互控制问题既包括了环境接触力对机械臂的控制,同时也考虑了人的操作力对机械臂的控制问题,需要解决这两个力共同作用于机械臂的交互控制问题。iTASC^[13]是一种基于速度控制的方法,可用于多任务控制框架,适用于复杂情况下对控制任务的描述,但基于速度来完成力控制则较为少见,因此本文也将其应用推广到了交互控制上。每个iTASC控制应用包括了任务、机械臂、目标物体、场景图以及一个求解器。

建立场景图如图2所示,定义: $\{W\}$ 为世界坐标系,固定在机械臂的基座上; $\{S_1\}$ 和 $\{S_2\}$ 坐标系分别固定在力传感器I和力传感器II的测量端面上,传感器的固定端固连在机械臂末端上,工具端分别与手把、工具连接; $\{C_1\}$ 坐标系固定在手把上; $\{C_2\}$ 为一个运动的坐标系,以工具末端和环境的接触点为原点,工具的轴线方向为Z轴方向。同时定义:整个系统的柔顺度为 C_y ,其包括了机械臂的柔顺度 C_r 、末端工具的柔顺度 C_t 以及环境的柔顺度 C_e ,系统的输入为接触点的速度 y ,通过求解

器得到机械臂各个关节角的转动速度, 从而控制机械臂运动.

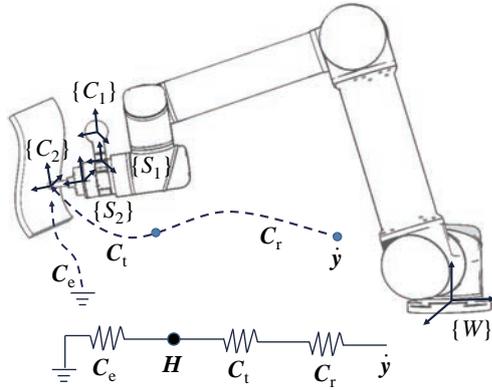


图 2 场景图
Fig.2 The scene-graph

机械臂末端 (和环境的接触点) 在世界坐标系中的输出位置为 y , 通过运动学关系可以表示为

$$y = f(q, x_u) \quad (1)$$

式中 q 为机械臂的关节角, x_u 为整个系统的未能控制的自由度所产生的位移, 包括环境接触的变形量以及弹簧的变形量. 本文中, 交互环境限定为刚性环境, 环境的变形量忽略不计, 因此整个系统未能控制的自由度所产生的位移即为弹簧的变形量 δx :

$$\delta x = |f_s|/k_s \quad (2)$$

式中 k_s 为弹簧的刚度, f_s 为施加在弹簧上的力, 可以由传感器 II 测量得到. 由于工具仅沿着 $\{S_2\}$ 坐标系的 Z 轴方向运动, 因此坐标系 $\{C_2\}$ 相对于 $\{S_2\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}_{S_2}T_{C_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L - \delta x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 L 为弹簧不受力时工具末端到坐标系 $\{S_2\}$ 原点的距离. 因此, 从末坐标系 $\{C_2\}$ 到世界坐标系 $\{W\}$ 的正运动学变换可以表示为

$$T = {}^W T_{S_2} {}_{S_2} T_{C_2} \quad (4)$$

式中 ${}^W T_{S_2}$ 为坐标系 $\{S_2\}$ 相对于世界坐标系 $\{W\}$ 的变换矩阵. 在基于速度的控制方法中, 需要计算出目标在世界坐标系下的速度大小:

$$\dot{y} = J_q \dot{q} + {}^W T_{S_2} K_s \dot{f}_s \quad (5)$$

其中

$$K_s = \text{diag}(0, 0, 1/k_s, 0, 0, 0) \quad (6)$$

J_q 为机械臂的雅可比矩阵, 将关节速度映射为世界坐标系下的笛卡儿速度. ${}^W T_{S_2}$ 为从坐标系 $\{S_2\}$ 到 $\{W\}$ 的速度转换矩阵.

3.2 机械臂和环境的交互控制

机械臂典型的速度控制可以表示为

$$\dot{y} = K_p(y_d - y) + \dot{y}_d \quad (7)$$

式中 K_p 为速度增益矩阵, y_d 为机械臂运动的规划轨迹, \dot{y}_d 为所要达到的控制速度, y 为当前机械臂末端位置.

从之前的研究工作^[14]可知, 在使用基于速度控制的方法时, 力不能被直接控制, 必须转化成位移, 因此力和速度的关系可以表示为

$$y = C_y f \quad (8)$$

式中 C_y 为系统在世界坐标系下的柔顺度^[15], f 为施加在机械臂末端上的力, \dot{y} 为机械臂末端输出的速度.

为了控制具有一定柔顺性的机械臂, 一般只考虑静力学^[14], 机械臂的驱动模型可以表示为

$$\tau_q = K_q(q_d - q) \quad (9)$$

式中 τ_q 为关节输出力矩, K_q 为控制系统的增益矩阵, q_d 为控制所要达到的关节角, q 为当前机械臂的关节角, 该指令在一个通讯周期内完成, 因此 $q_d - q$ 可认为是关节的转动速度 \dot{q} , 即关节力矩的大小和关节的运动速度成正比. 另外, 机械臂的关节扭矩和末端输出力以及关节空间速度和末端输出速度的转换关系为

$$J_q^T f = \tau_q \quad (10)$$

$$J_q \dot{q} = \dot{y} \quad (11)$$

将式 (10)、(11) 代入式 (9), 整理可得到:

$$\dot{y} = J_q K_q^{-1} J_q^T f \quad (12)$$

对比式(8)可以得到机械臂在世界坐标系下的柔顺度为

$$C_r = J_q K_q^{-1} J_q^T \quad (13)$$

为了计算出整个系统的柔顺度, 在此还需要考虑弹簧的变形. 本文限定环境为刚性的, 因此工具和环境的接触为点接触, 从而可以得到接触力 f 和弹簧所受到的力 f_s 之间的关系为

$$f_s = K_f f \quad (14)$$

式中 $\mathbf{K}_f = \text{diag}(0, 0, 1, 0, 0, 0)$ 为 2 个力的转换矩阵。将式 (12) 和 (15) 代入式 (5) 可以得到末端接触点的速度在世界坐标系下表示为

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}_r \mathbf{f} + {}^W_{S_2} \mathbf{T}_v \mathbf{K}_s \mathbf{K}_f \dot{\mathbf{f}} \quad (15)$$

控制的目的是给环境施加一个静态的力, 即 $\dot{\mathbf{f}} = 0$, 因此整个系统的柔顺度即为机械臂的柔顺度:

$$\mathbf{C}_y = \mathbf{H} \mathbf{J}_q \mathbf{K}_q^{-1} \mathbf{J}_q^T \quad (16)$$

式中 \mathbf{H} 为选择矩阵, 对角元素只包含 0 或 1. 为了控制接触力能达到一个稳定的值, 在此采用了 PD 控制方法:

$$\dot{\mathbf{y}}_d = \mathbf{K}_p \mathbf{C}_y (\mathbf{f}_{c,d} - \mathbf{f}_c) + \mathbf{K}_d \mathbf{C}_y (\dot{\mathbf{f}}_{c,d} - \dot{\mathbf{f}}_c) \quad (17)$$

式中 \mathbf{f}_c 为工具和环境之间的接触力反馈, $\mathbf{f}_{c,d}$ 为需要达到的接触力, $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 为对角矩阵. 另外, 在控制中由于采用数值差分方式容易引起高频干扰, 因此对于接触力采用了低通滤波的方式进行预处理.

3.3 人与机械臂的交互控制

人与机械臂的交互体现在机械臂对人的意图感知上, 通过解析人对其施加的力从而做出运动决策, 即完成跟随运动, 从而达到减轻人的工作强度的目的. 因此, 准确的意图感知与分析是达到良好交互的前提. 通过式 (13) 虽然能建立起机械臂的力和速度的关系, 但是柔顺度矩阵是一个变化的矩阵, 随着机械臂所处位置姿态的不同而改变, 对于操作者来说难以达到一种固化的操作感觉. 为了达到一个较好的交互效果, 在此直接使用刚度矩阵来代替柔顺度矩阵:

$$\dot{\mathbf{y}}_d = \mathbf{K}_h \mathbf{f}_h \quad (18)$$

式中 \mathbf{f}_h 为人的操作力, \mathbf{K}_h 为刚度矩阵, $\dot{\mathbf{y}}_d$ 为由人的操作力所产生的速度, 即人施加的力对应机械臂的运动方向, 施加的扭矩对应姿态调整, 力或扭矩的大小与机械臂运动速度成正比. 当机械臂处于自由空间时 (没有运动限制), 整个系统表现为一个具有固定阻尼常数的阻尼器.

3.4 逆运动学求解器

由于本文中机械臂的自由度为 6, 因此当得到机械臂末端的速度后, 控制关节运动的输入速度 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 可以通过逆运动学求解得到:

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{J}_q^{-1} \dot{\mathbf{y}}_d \quad (19)$$

当机械臂处于奇异点时, 雅可比矩阵的秩小于 6, 从而导致其无法求逆. 在此采用了阻尼最小二乘法 (DLS) [16] 对奇异点进行规避, 其本质为找到一个满秩的矩阵代替雅可比矩阵, 从而在奇异点附近根据规划的轨迹完成一个近似的求解. 速度求解可以表示为

$$\dot{\mathbf{q}}_d = (\mathbf{J}_q^T \mathbf{J}_q + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}_q^T \dot{\mathbf{y}}_d \quad (20)$$

式中 λ 为阻尼因子, \mathbf{I} 为单位矩阵. 当 $\lambda = 0$ 时式 (20) 退化为式 (19), 从而在奇异点处无法求解; 当 $\lambda > 0$ 时, 式 (20) 即使在奇异点处也能求解, 因此 λ 可以用于调整运动轨迹偏离奇异点的程度. 阻尼因子可以根据以下法则 [17] 得到:

$$\lambda^2 = \begin{cases} 0, & \delta > m \\ (1 - (\delta/m)^2) \lambda_{\max}^2, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\delta = \sqrt{\det(\mathbf{J}_q \mathbf{J}_q^T)}$ 用于衡量机械臂当前位置与奇异点的距离, m 与 λ_{\max} 可以根据精度的要求进行调整.

4 交互力检测 (Interaction force measurement)

交互力包括了机械臂与环境的接触力以及人对机械臂施加的操控力, 在此使用了 2 个 6 维力传感器, 固定端固定在机械臂末端法兰上, 测量端分别与操作手把和工具连接. 当机械臂处于不同姿态时, 由于工具本身质量的存在, 会与交互力叠加从而影响力的准确检测, 因而需要对传感器连接的工具进行重力补偿. 另外, 由于温度、湿度等环境因素的变化, 传感器的零点也会产生漂移, 间隔的时间越久, 产生的漂移越大, 因此需要在机械臂每次工作之前对其零点漂移量作处理.

用于接触力测量的传感器, 其直接返回的值由 3 部分构成:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_c \quad (22)$$

式中 \mathbf{f}_0 为传感器的零点漂移量, \mathbf{f}_g 为工具自身的重力, \mathbf{f}_c 为末端与环境的接触力.

不管机械臂处于什么姿态, 传感器工具端所受到的重力都是竖直向下的, 与世界坐标系 Z 轴方向相反, 从而由自重产生的力在世界坐标系中可表示为

$${}^W \mathbf{f}_g = [0 \ 0 \ -G]^T \quad (23)$$

将其转换到传感器坐标系下可得:

$${}^{S_2} \mathbf{f}_g = {}_{S_2}^W \mathbf{R} {}^W \mathbf{f}_g \quad (24)$$

式中 ${}^S_W \mathbf{R}$ 为世界坐标系 $\{W\}$ 相对于传感器坐标系 $\{S_2\}$ 的旋转变换矩阵。

其自重产生的扭矩 ${}^S \boldsymbol{\tau}_g = \mathbf{r} \times {}^S \mathbf{f}_g$, 其中 \mathbf{r} 为传感器坐标系原点到工具重心的矢量矩阵。因此由于重力产生的力和力矩为

$$\mathbf{f}_g = [{}^S \mathbf{f}_g \quad {}^S \boldsymbol{\tau}_g]^T \quad (25)$$

假设传感器零点产生的漂移量为

$$\mathbf{f}_0 = [\mathbf{f}_1 \quad \boldsymbol{\tau}_0]^T \quad (26)$$

则最终接触力可以表示为

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{f} - \mathbf{f}_g - \mathbf{f}_0 \quad (27)$$

式中包含了 \mathbf{r} 、 G 、 \mathbf{f}_1 、 $\boldsymbol{\tau}_0$ 四个未知量, 需要通过机械臂在不同姿态下返回的力传感器值对其进行估计, 在此不详细展开, 具体方法可参考文 [18]。

5 力/位/阻抗混合控制 (Hybrid position-impedance-force control)

交互控制的框架如图 3 所示, 其中包括了交互力的测量和传递, 从而转换成速度驱动机械臂的运动。顶部的控制环通过正运动学计算进行位置/姿态的实时追踪, 并和预先规划好的区域 \mathbf{y}_r 与姿态角 θ_r (工具轴线和接触面法线的夹角) 对比, 由控制器 C_r 来生成控制速度 $\dot{\mathbf{y}}_{r1}$ 限制机械臂的运动。中间部分的控制输入为人对机械臂末端手把施加的力 \mathbf{f}_h , 通过刚度矩阵完成力与机械臂末端运动速度的一一对应。底部的控制环用于完成机械臂和环境之间接触力的控制, 输入为控制所要达到的接触力 $\mathbf{f}_{c,d}$, 通过与反馈力 \mathbf{f}_c 的比较得到控制偏差, 然后输入到 PD 控制模块中, 从而达到稳定值。由各个力产生的速度通过分解进行叠加, 最终通过逆运动学求解器求解得到关节速度, 从而驱动机械臂运动。

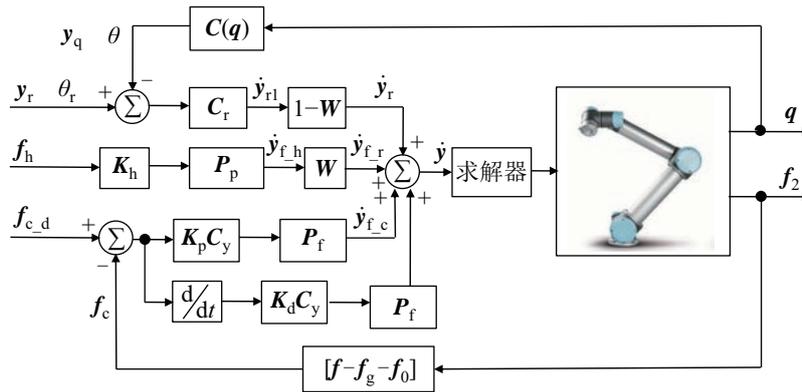


图 3 交互控制框图

Fig.3 The interaction control architecture

为了控制机械臂在移动中与环境保持一个恒定的接触力, 需要将控制任务分解到法线方向与切向方向上。机械臂在法线方向上的运动完成接触力的控制, 切线方向上的运动完成位置控制, 即通过力/位混合控制的方式来完成对未知环境的轮廓跟踪。另外, 由于机械臂对人的意图识别本身存在一定的模糊性, 很难通过人来直接控制机械臂完成精确定位以及一系列基于力/位置的复杂任务, 因此本文采取了一种较为有效的方法, 由人对机械臂的粗略位置进行控制, 同时由机械臂自身来完成更加精确的位置/姿态调整, 从而结合两者的优点, 使人机协作成为可能。

5.1 任务分解

当机械臂末端和刚性环境接触时, 只传递力, 不传递扭矩。假定接触面光滑, 可忽略摩擦力的作

用, 从而接触力的方向即为接触面的法线方向, 单位法线矢量可以表示为

$$\mathbf{n} = \mathbf{f}_t / |\mathbf{f}_t| \quad (28)$$

为了控制工具末端沿着接触面运动并保持一定大小的接触力, 可将任务分解到切线方向与法线方向上, 由法线方向上的速度来控制接触力的大小, 由切线方向上的速度保持末端沿着接触面运动。由射影理论可以得到力控制的射影算子与位置控制的射影算子分别为

$$\mathbf{P}_f = \begin{bmatrix} \mathbf{nn}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{P}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{nn}^T & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (30)$$

结合式 (17)、(18), 力和位置的控制任务可以解耦为

$$\dot{\mathbf{y}}_{f,h} = \mathbf{P}_p \mathbf{K}_h \mathbf{f}_h \quad (31)$$

$$\dot{\mathbf{y}}_{f,c} = \mathbf{P}_f [\mathbf{K}_p \mathbf{C}_y (\mathbf{f}_{c,d} - \mathbf{f}_c) + \mathbf{K}_d \mathbf{C}_y (\dot{\mathbf{f}}_{c,d} - \dot{\mathbf{f}}_c)] \quad (32)$$

其中 $\dot{\mathbf{y}}_{f,h}$ 为末端工具沿着切线方向的运动速度, 由人与机械臂的接触力产生; $\dot{\mathbf{y}}_{f,c}$ 为沿着法线方向的速度, 用于完成接触力大小的控制.

5.2 基于阻抗控制的运动约束

在交互控制中, 安全性不仅仅体现在力控制上, 同时也体现在对机械臂位置和姿态的约束上. 与机械臂交互环境的形状特征以及位置是未知的, 因此安全区域 \mathbf{y}_r (图4) 主要由已知的条件决定, 包括人的位置、机械臂的允许操作空间等. 安全区域应当包含所需的工作空间范围, 并且不与周围非目标物体发生碰撞. 另外, 在此定义了安全姿态角 θ_r , 即为末端工具轴线方向和接触面法向的夹角, 从而可以将其末端工具限定在以接触点为顶点的圆锥内, 该圆锥随着接触点位置的变化而移动 (图4).

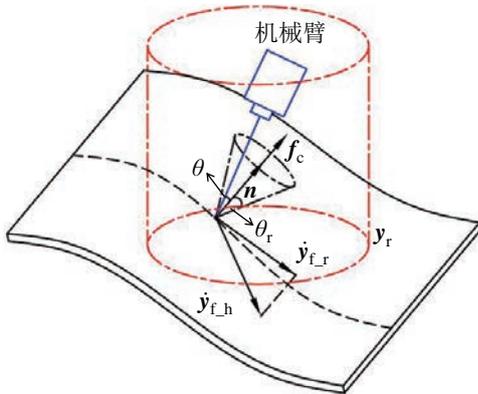


图4 运动约束

Fig.4 The motion constraint

在交互过程中, 通过正运动学 $\mathbf{C}(q)$ 可以实时计算出机械臂当前的位姿, 通过和安全区域 \mathbf{y}_r 以及安全姿态角 θ_r 的对比来决定权重矩阵 \mathbf{W} 的值, 从而限制机械臂在安全区域内运动. 在此, \mathbf{W} 是一个对角矩阵:

$$\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6), w_i \in [0, 1] \quad (33)$$

最终生成的速度可以表示为

$$\dot{\mathbf{y}} = (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{W}) \dot{\mathbf{y}}_r + \mathbf{W} \dot{\mathbf{y}}_{f,h} + \dot{\mathbf{y}}_{f,c} \quad (34)$$

在切向方向上的速度可以表示为

$$\dot{\mathbf{y}}_t = (\mathbf{I}_{6 \times 6} - \mathbf{W}) \dot{\mathbf{y}}_r + \mathbf{W} \dot{\mathbf{y}}_{f,h} \quad (35)$$

当 $\mathbf{W} = 1$ 时, 机械臂由人的操作力控制, 其控制刚度为 \mathbf{K}_h , 即机械臂在切向上跟随人手的运动. 当 $\mathbf{W} = 0$ 时, 机械臂为纯位置控制, 其刚度可认为无穷大. 当机械臂末端偏离安全区域越远时, \mathbf{W} 的值越小, 此时速度 $\dot{\mathbf{y}}_r$ 所占的比重增加, $\dot{\mathbf{y}}_{f,h}$ 所占比重减小, 从而对人产生的反馈力增加, 即偏离安全区域的距离和机械臂对人产生的反馈力成正比, 从而达到阻抗控制的效果, 将机械臂限定在安全区域内运动.

6 实验 (Experiment)

本文在 UR5 机械臂上进行了交互算法的验证, 通过在末端安装 2 个 SRI 六轴力传感器来完成操控力和接触力的检测 (图5). 传感器的输出量为模拟量, 通过采集卡完成数字量的转换, 通过串口与控制器连接, 通讯频率为 200 Hz. 机械臂的控制程序基于 Matlab robotics toolbox 进行编写, 然后生成 C++ 文件整合到控制软件中, 上位机和机械臂控制器通过 TCP/IP socket 进行通讯, 通讯频率为 200 Hz, 机械臂控制器和机械臂的通讯频率为 125 Hz.



图5 UR5 实验平台

Fig.5 The UR5 experimental platform

通过 4 个不同的实验对算法进行了验证:

(1) 力传感器重力和零点漂移补偿: 传感器 I 所连接的手把重量比较小, 由姿态变化产生的重力影响可忽略, 因此只需对其零点漂移进行补偿; 力传感器 II 连接的工具有有一定的重量, 需要对其进行重力和零点漂移的补偿. 图6给出了实验结果, 左边部分为补偿之前机械臂姿态变化时传感器 II 所采集到的数据, 右边部分为补偿后的结果, 各个方向力补偿的均方根误差 (理想状态下补偿以后为 0) 分别为 0.02 N、0.03 N、0.08 N、0.003 N·m、0.001 N·m、0.001 N·m, 最大误差为 0.15 N (传感器 II 在 Z 轴方向上的误差最大, 其量程为 200 N,

测量精度为 0.1 N), 力矩误差为 0.01 N·m.

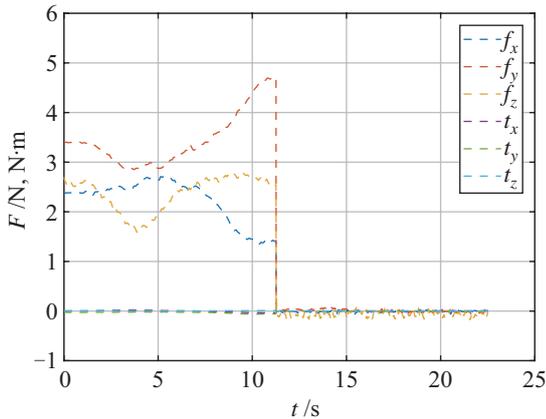


图 6 实验 1: 重力和零漂的补偿结果

Fig.6 Experiment 1: the compensation result of gravity and zero drift

(2) 机械臂和环境的交互: 在第 2 个实验中, 工具末端和环境接触, 并施加一个特定大小的力, 在此过程中没有人的参与. 机械臂和环境接触之前工具轴线方向不与接触面的法向方向重合 ($\theta \neq 0^\circ$). 当检测到接触力时, 能得到接触面的法线方向, 在施加接触力的同时调整末端工具的姿态与法线方向重合. 设定 $\theta_r = 0^\circ$, 实验结果如图 7 所示, 在第 2.3 s 时末端开始与环境接触, 在第 6 s 时接触力达到了 6 N, 此后接触力维持在 6 N 左右, 并有少许的波动, 稳定以后的控制精度为 0.2 N; 姿态从最初的 19° 调整到与接触面基本垂直的状态, 静态下姿态调整的精度为 0.3° .

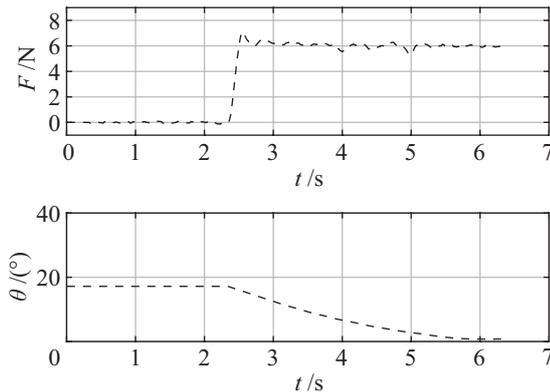


图 7 实验 2: 接触力和姿态角的变化

Fig.7 Experiment 2: the change of contact force and pose angle

(3) 机械臂和人的交互: 在第 3 个实验中, 对人一机械臂交互控制的精度以及操控的灵活性进行了试验. 操作者直接把持末端手把, 拖动机械臂从而控制末端沿着一个圆与一条直线运动 (图 8). 运动轨迹的最大偏离量约为 0.5 cm (与控制的速度有关, 速度越大, 精度越低), 在低速下其具有一定的控

制精度与较好的灵活性. 这是由于人在对手把施加力时, 在手把与传感器的连接处也会产生一个力矩, 而且力的作用点离传感器越远, 效果越明显, 即通过手把操控的方式对力和力矩的检测存在一定的耦合, 从而导致机械臂难以精确地识别人的意图, 只能通过人眼的反馈来不断调节位置的偏差, 同时这也应验了前文提到的交互不确定性问题, 单靠人直接对机械臂进行控制只能完成机械臂的粗定位, 对于更精细的控制任务是难以完成的, 这也是目前人机交互控制难以实际应用的原因之一.

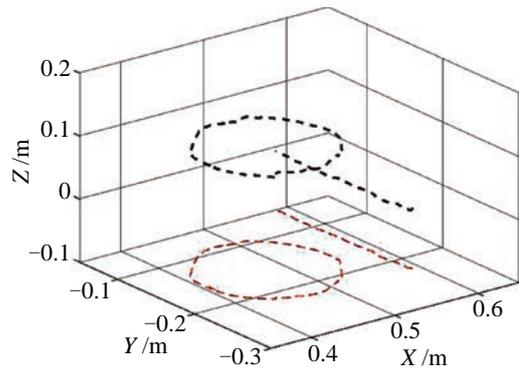


图 8 实验 3: 末端轨迹图

Fig.8 Experiment 3: the end point trajectory

(4) 多交互实验: 在第 4 个实验中, 将机械臂、未知环境 (一个倾斜的平面, 但倾斜角度是未知的) 和人放到一起, 环境的接触力、人的操控力共同完成对机械臂的运动控制. 同时在交互的过程中, 针对工作空间限定了一个圆环状区域来限制机械臂的运动, 安全姿态角 θ_r 设定为 0° , 即控制机械臂在运动的过程中末端工具的姿态始终与接触面保持垂直. 接触点的轨迹如图 9 所示, 机械臂在人的引导下运动, 运动被限定在 2 个圆柱面之间. 从图 9 可知机械臂共 6 次接近安全区域的边界, 对应于图 10 中的 f_h 也出现了 6 次极值, 即当机械臂处于安全区域内部时, 所需要的操控力 f_h 较小; 当靠近边界时, 所需的操控力变大, 直至无法拖动机械臂, 从而对人产生一个反馈力. 接触力 f_c 的控制移动过程中也能保持较好的稳定, 另外由于移动过程中存在摩擦力, 因此末端工具姿态的调整存在 2° 左右的误差. 从实验结果可知, 该控制方法能较好地实现轮廓跟踪的任务, 即在人的引导控制下完成末端工具和环境表面的接触, 并且在移动过程中能由机械臂来完成精细的姿态控制以及接触力控制, 安全区域的限制也能较大地提高交互的安全性, 避免对其他物体产生碰撞.

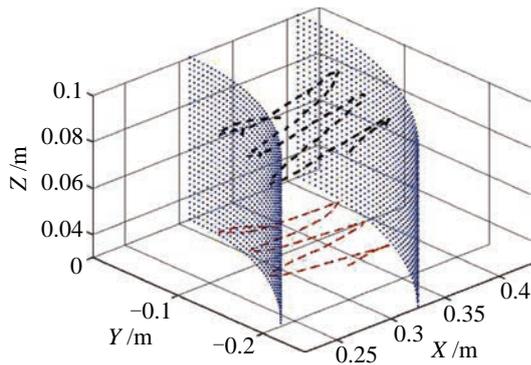


图9 实验4: 接触点轨迹图

Fig.9 Experiment 4: the contact point trajectory

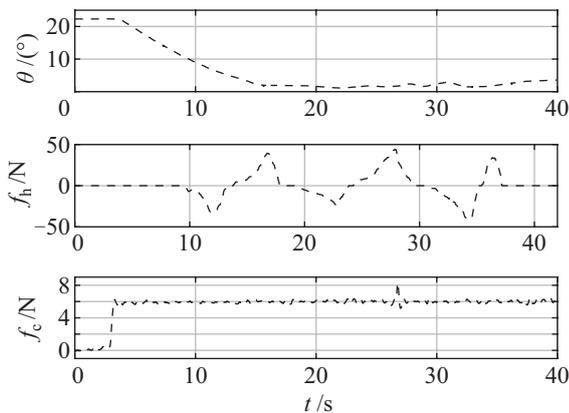


图10 实验4: 实验中交互力和姿态角的变化

Fig.10 Experiment 4: the change of interaction force and pose angle

7 结论 (Conclusion)

本文基于 iTaSC 框架与力/位/阻抗混合方法提出了一种用于人、机械臂以及环境三者之间的交互控制方法,该方法基于速度控制.对机械臂和柔性工具进行了建模,求解了系统的柔顺度,从而建立起速度/位置与力的关系,实现了机械臂和环境之间接触力的控制,并通过刚度矩阵实现了人对机械臂的拖动控制.在交互的过程中,通过力/位混合控制实现了轮廓跟踪任务,基于阻抗控制建立了安全空间以及安全姿态角,提高了交互的安全性以及人机协作的效率.最后在 UR5 机械臂上完成了对该算法有效性的验证.

该方法针对环境以及人机交互中存在的确定性问题,综合了机械臂精度高以及人决策能力强的优点,通过人来引导机械臂运动,同时由机械臂完成精细的力控制以及姿态调整,从而使人机协作成为可能.相比于传统的底层力矩控制,该方法偏向于更高层的控制,对上位机操作系统的实时性以及通讯频率的要求较低,因此是一种简便而且安全性高的交互控制方式,对于人机协作(如去毛刺、打

磨等工业应用)的推广具有一定意义.

参考文献 (References)

- [1] Ficuciello F, Villani L, Siciliano B. Variable impedance control of redundant manipulators for intuitive human-robot physical interaction[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(4): 850-863.
- [2] 刘维惠, 陈殿生, 张立志. 人机协作下的机械臂轨迹生成与修正方法[J]. 机器人, 2016, 38(4): 504-512. Liu W H, Chen D S, Zhang L Z. Trajectory generation and adjustment method for robot manipulators in human-robot collaboration[J]. Robot, 2016, 38(4): 504-512.
- [3] Xiong G L, Chen H C, Zhang R H, et al. Robot-environment interaction control of a flexible joint light weight robot manipulator[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(1-2): No.76.
- [4] Heck D J F, Saccon A, van de Wouw N, et al. Switched position-force tracking control of a manipulator interacting with a stiff environment[C]//American Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 4832-4837.
- [5] Nef T, Lum P. Improving backdrivability in geared rehabilitation robots[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2009, 47(4): 441-447.
- [6] Rooks B. The harmonious robot[J]. Industrial Robot, 2006, 33(4): 125-130.
- [7] Hirzinger G, Sporer N, Albu-Schaffer A, et al. DLR's torque-controlled light weight robot III - Are we reaching the technological limits now?[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 1710-1716.
- [8] Borghesan G, Willaert B, de Schutter J. A constraint-based programming approach to physical human-robot interaction[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 3890-3896.
- [9] Magrini E, Flacco F, de Luca A. Control of generalized contact motion and force in physical human-robot interaction[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 2298-2304.
- [10] Lamy X, Colledani F, Geffard F, et al. Overcoming human force amplification limitations in comanipulation tasks with industrial robot[C]//8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 592-598.
- [11] Mahvash M, Dupont P E. Stiffness control of surgical continuum manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(2): 334-345.
- [12] Capisani L M, Ferrara A. Trajectory planning and second-order sliding mode motion/interaction control for robot manipulators in unknown environments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3189-3198.
- [13] de Schutter J, de Laet T, Rutgeerts J, et al. Constraint-based task specification and estimation for sensor-based robot systems in the presence of geometric uncertainty[J]. International Journal of Robotics Research, 2007, 26(5): 433-455.
- [14] Borghesan G, de Schutter J. Constraint-based specification of hybrid position-impedance-force tasks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 2290-2296.
- [15] Cutkosky M R, Kao I. Computing and controlling compliance of a robotic hand[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(2): 151-165.

- [16] Yong Y S, Huang Y, Chiba R, et al. Teaching-playback robot manipulator system in consideration of singularities[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 453-458.
- [17] Chiaverini S, Siciliano B, Egeland O. Review of damped least squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1994, 2(2): 123-134.
- [18] Bassi E, Benzi F, Capisani L M, et al. Characterization of the dynamical model of a force sensor for robot manipulators[C]//7th

International Workshop on Robot Motion and Control. Berlin, Germany: Springer, 2009: 243-253.

作者简介:

段星光 (1966-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 医疗机器人, 仿生机构与控制.

韩定强 (1993-), 男, 硕士生. 研究领域: 人机交互控制.

马晓东 (1964-), 男, 博士, 主任医师. 研究领域: 神经外科, 脑肿瘤, 医疗机器人.