

# 基于顺应性跟踪控制的工业机器人直接示教系统<sup>①</sup>

徐建明<sup>②</sup> 丁毅 禹鑫焱 俞立

(浙江工业大学 信息工程学院 杭州 310023)

**摘要** 研究了机器人直接示教问题,开发了 Stäubli TX90 工业机器人的直接示教系统。该系统采用一种基于速度调节的顺应性跟踪控制方法,因而能够通过力控制器调节机械臂末端执行器参考速度,实现机械臂对牵引力的顺应性跟踪;同时定期采集并存储机械臂运动轨迹,通过 Douglas-Peucker 矢量数据压缩算法去除冗余轨迹点,生成示教轨迹。基于 VAL3 机器人语言编写了直接示教程序模块,并嵌入 Stäubli 工业机器人示教系统。最后,通过试验验证了所设计直接示教系统的有效性。

**关键词** 顺应性跟踪控制, 直接示教, 工业机器人

## 0 引言

要想用机器人代替人进行作业,必须预先对其示教或编程,以确保其完成应该完成的动作和作业任务。机器人示教有两种方式:直接示教和离线示教(间接地对机器人示教)。传统的工业机器人示教方法是通过操作示教盒移动机器人到指定的位置,并记录下此时机器人的位置作为路径点,如此重复操作确定机器人的运动路径。这种示教方法对操作者技术要求较高,需要熟悉示教盒操作流程和机器人编程语言,尤其对于轨迹复杂、路径点多的任务,示教过程十分耗时。直接示教是指操作人员可以牵引机器人工具末端执行任务,机器人实时记录整个示教轨迹。示教完成后,机器人根据记录的数据能准确再现示教轨迹。市场上的工业机器人系统一般都不具备直接示教功能,而在工业机器人应用领域又有降低使用门槛、简化示教过程、缩短示教时间的需求。因此,基于市场上的工业机器人开发直接示教系统具有实用价值。

近年来,国内外一些学者在直接示教和机器人

自动编程方面开展了大量研究。胡建元<sup>[1]</sup>用六维力传感器检测力信号,应用力信号转变为机械手位置调整量的方法,在五关节机械手 Movemaster-EX 上实现了直接示教功能。吴威<sup>[2]</sup>等采用四维力传感器信号修正机器人的位置,通过机器人顺应性跟踪解决机器人焊接任务的示教问题。Daisuke 等<sup>[3]</sup>提出了一种自由力控制方法,能使操作人员平稳地牵引机器人工具运动,并搭建二连杆机械臂模型进行了仿真实验,证明了这种方法的有效性和可靠性。Asada 等<sup>[4]</sup>基于力/位混合控制提出了一种机器人自动编程方法,能从示教得到的轨迹数据和生成机器人运动控制代码。Li 等<sup>[5]</sup>针对直接示教得到的轨迹点与期望轨迹存在误差的问题,提出了一种轨迹修正算法,且当工作空间中的工件位置发生变化时,能自动更新轨迹,不需要再次进行示教。Park 等<sup>[6]</sup>针对单个力传感器无法记录示教过程中机器人与环境接触力的问题,采用两个力传感器分别实现顺应性跟踪和机器人末端接触力检测功能。Choi 等<sup>[7]</sup>以一种多维力/位移方法传感器(COSMO)为基础构成了直接示教装置,根据这个装置上点阵列的导通状态判断出操作力的方向,从而控制机械臂运

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(61374103),863 计划(2014AA041601-05)和浙江省科技厅计划(2014C31107)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1970 年生,博士,教授;研究方向:迭代学习控制,电机伺服控制技术,机器人控制技术等;联系人,E-mail: xujin@zjut.edu.cn  
(收稿日期:2015-03-22)

动。张宇等<sup>[8]</sup>提出了一种无力传感器基于力矩控制的直接示教方法,但由于购置的工业机器人对用户往往不开放力矩控制,因此难以在实际中应用。本文在以上研究的基础上给出了一种基于顺应性跟踪控制的工业机器人直接示教系统,该直接示教系统通过在机械臂腕部与工具之间安装力传感器“获知”操作人员的运动意图;在机械臂所有自由度上均采用力控制,基于力偏差信号调节机械臂末端执行器的运动速度,实现机械臂对牵引力的顺应性跟踪;定期采集、存储机械臂运动轨迹点,并通过 Douglas-Peucker 矢量数据压缩算法<sup>[9]</sup>去除冗余轨迹点,最终生成示教轨迹;使用机械臂的位置控制功能复现示教轨迹。本文研究的直接示教方法已被编写成直接示教程序模块嵌入 Stäubli TX90 工业机器人示教操作系统,以避免繁琐的传统示教和代码编写过程。

## 1 机械臂直接示教系统结构

本文的直接示教系统由顺应性跟踪控制、示教轨迹生成和复现示教路径组成。系统部件如图 1 所示,主要由 Stäubli TX90 工业机器人、力检测与采集系统、控制器 CS8C 三部分组成。TX-90 工业机器人的现场布局如图 2 所示。

为了让机械臂“获知”操作人员的运动意图,设计了一种力检测与采集装置来反馈机械臂末端受到的外力。本文使用的六维 ATI 力传感器型号为 Mini45, ATI 传感器采用的是硅应变原理,由传感器受到挤压输出应变信号,经由 NetBox 调制器进行放大、滤波处理,最后输出可以识别的数字信号。

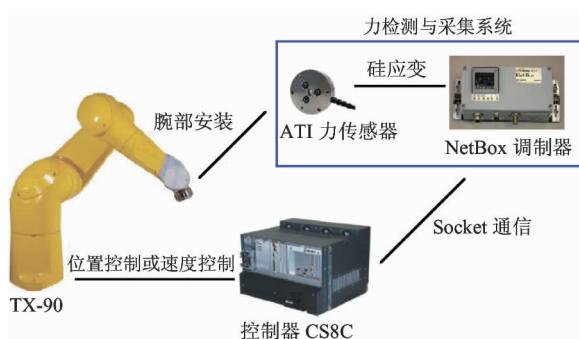


图 1 系统部件组成



图 2 TX-90 工业机器人系统

本文通过以太网将控制器 CS8C 提供的 Socket 通讯接口与 NetBox 调制器连接,基于 TCP/IP 协议将检测到的外力数据传输到控制器中,其中 CS8C 作客户端、NetBox 作服务器端。Socket 通信过程如图 3 所示,当完成 TCP 三次握手后,客户端与服务器端建立连接,CS8C 主动向 NetBox 发送请求报文,请求报文中包含对力信号处理命令字段;服务器端接收到请求报文后,将采集到的力信号写入响应报文中发送到客户端,客户端根据通讯协议解析相应的报文段即可得到检测到的外力值。

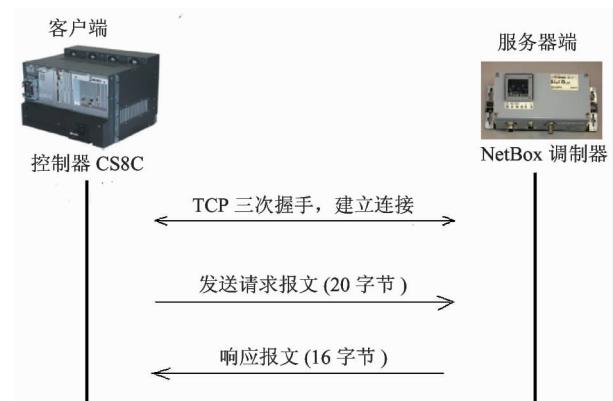


图 3 Socket 通信过程

## 2 顺应性跟踪控制

由于目前市场上大多数工业机器人系统一般不

对用户开放力矩控制,因此,顺应性跟踪控制只能基于机器人的位置控制或速度控制来实现。

## 2.1 顺应性跟踪控制结构

基于速度调节的顺应性跟踪控制方法如图 4 所示,当操作人员牵引机械臂工具时,由力传感器测量在传感器坐标系  $\{S\}$  下的外力值为  ${}^sF_e$ ,由于操作人员是通过牵引机械臂末端工具执行示教任务,则需要获得末端工具坐标系  $\{T\}$  下的外力值  ${}^TF_e$ ,可以通过笛卡尔坐标变换后得到机械臂末端工具坐标系  $\{T\}$  下的外力值。由于力传感器测量得到的力信号夹杂着高频噪声,所以使用低通滤波器对高频

噪声进行抑制,通过低通滤波器的力信号为  ${}^T\tilde{F}_e$ ;设定期望外力值  ${}^TF_d = 0$ ,力偏差  $\Delta F = {}^TF_e - {}^T\tilde{F}_e$  作为力控制器输入,力控制输出作为机械臂工具末端笛卡尔坐标系  $\{T\}$  下的设定速度  ${}^TV$ 。依据关系

$${}^TV = J(q)V_q \quad (1)$$

(其中  $J(q)$  表示雅克比矩阵,  $V_q$  表示关节速度),可计算出关节速度  $V_q$ ,再输入机械臂关节速度控制器,控制各关节的运动速度,使机械臂沿着操作人员作用力方向运动。图 4 中虚线框部分由 VAL3 语言编程实现,Stäubli 工业机器人采用速度控制方式,并提供速度控制功能接口函数。

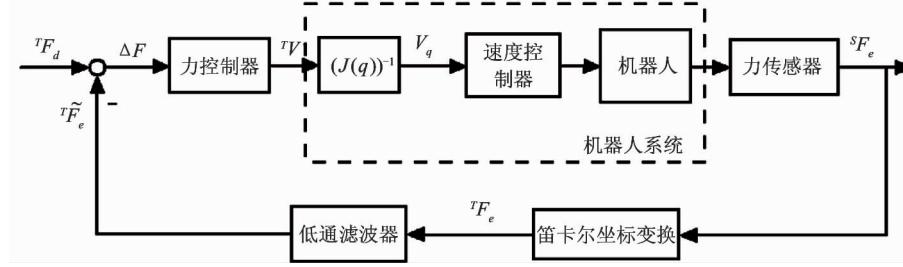


图 4 基于速度的顺应性跟踪控制系统结构图

## 2.2 力控制器的设计

力控制器采用 PI 调节器:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (2)$$

其中  $K_p$  为比例控制参数,  $K_I$  为积分控制参数。力控制器输出

$${}^TV = K_p \Delta F + K_I \int \Delta F dt \quad (3)$$

作为机械臂工具末端笛卡尔坐标系  $\{T\}$  下的速度设定值,控制机械臂沿着减少力偏差的方向运动。由于力传感器受到噪声或扰动的影响,在外部未施加作用力的情况下,测量值也会在零值附近浮动。因此,可以设置力控制死区,当力控制偏差  $\Delta F$  绝对值大于阈值  $th$  时,则认为系统受到了操作人员牵引力作用。但是阈值  $th$  不宜取的过大,应使其大于力传感器在系统稳态情况下的最大噪声幅度。

## 3 示教轨迹生成

在操作人员执行顺应性跟踪任务时,系统定期

地采集机械臂工具末端位置并存储。直接示教系统基于 Stäubli 工业机器人系统进行二次开发,采用 VAL3 机器人编程语言<sup>[10]</sup> 编写程序。使用 VAL3 位置反馈指令 point here( tool tTool, frame fReference ) 返回 tTool 工具在 fReference 坐标系中的当前位置,或者使用指令 joint herej() 返回当前机械臂各关节位置。

采样周期是影响复现路径精度的重要因素之一,采样周期越小会使复现的路径精度越高,但是也会使采集的数据点增多,占用大量的存储空间。在由示教得到轨迹点后,应用 Douglas-Peucker 算法去除冗余轨迹点,可以节省存储空间。

Douglas-Peucker 算法的步骤如下:

(1) 连接曲线的起点  $a$  和终点  $b$ , 得到曲线的弦  $ab$ , 弦  $ab$  方程为

$$Ax + By + C = 0 \quad (4)$$

(2) 计算曲线上各点到弦  $ab$  的距离,并找出其中距离最大的点  $c$ , 点到直线的距离公式为

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (5)$$

记录此时的最大距离  $d_{\max}$ 。

(3) 设定阈值  $t(t > 0)$ , 若  $d_{\max} < t$ , 则该直线段作为曲线的近似, 该曲线处理结束。

(4) 若  $d_{\max} \geq t$ , 用点  $c$  把曲线分割成两段  $ac$  和  $cb$ , 分别对这两段曲线重复算法步骤(1)至(3)。

(5) 在所有曲线段都处理结束后, 依次用直线连接各个分割点形成的图形, 可以近似表示原来的曲线。

可根据实际任务的精度要求, 选择阈值  $t$ , 最后生成示教轨迹。

## 4 直接示教系统程序设计

本文的直接示教系统基于示教盒实现流程控制、数据监控和按键响应等功能。该系统具有三个工作模式, 即等待模式、示教模式和复现路径模式, 如图 5 所示。首先启动直接示教系统, 系统进入等待模式, 此时操作人员可以牵引机械臂工具到达示教起点。按下示教按键后, 系统进入示教模式, 操作人员牵引机械臂工具执行任务, 程序定周期记录工具末端位置坐标值。若示教过程发生错误, 则可以返回等待模式, 清除已记录的位置坐标点, 重新开始示教任务; 若示教任务已完成, 则按下复现按键, 此时示教模式结束, 机械臂进入复现路径模式自动读取记录的轨迹点, 以复现记录的轨迹。

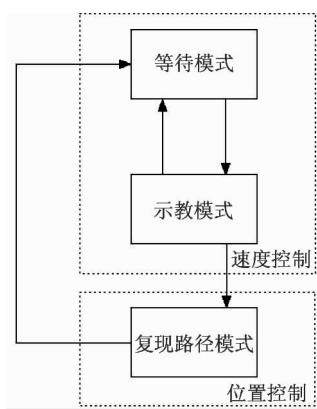


图 5 工作模式流程图

在示教模式, 机械臂工作在速度控制模式; 在复现路径模式, 机械臂在位置控制模式下调用 movel 等运动控制指令复现记录的轨迹点。示教-复现流

程图如图 6 所示。

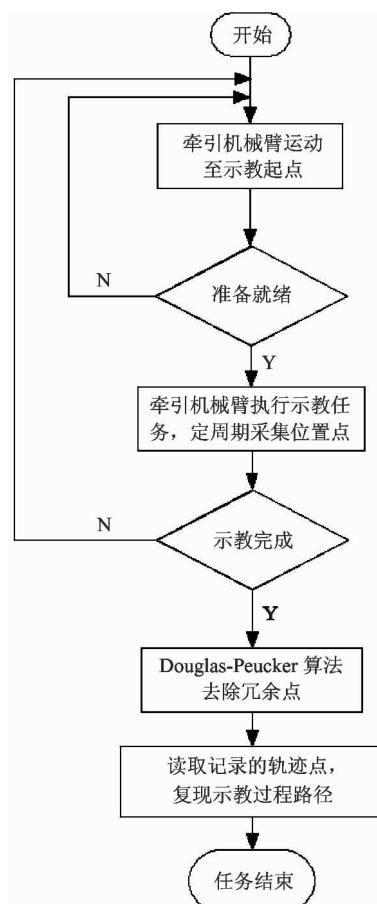


图 6 示教-复现流程图

### 4.1 直接示教模块总体设计

直接示教系统使用 VAL3 语言编写, 按照功能划分可以将直接示教系统分为系统主控模块、任务管理模块、Socket 通信模块、运动控制模块和用户界面模块, 软件功能结构如图 7 所示。

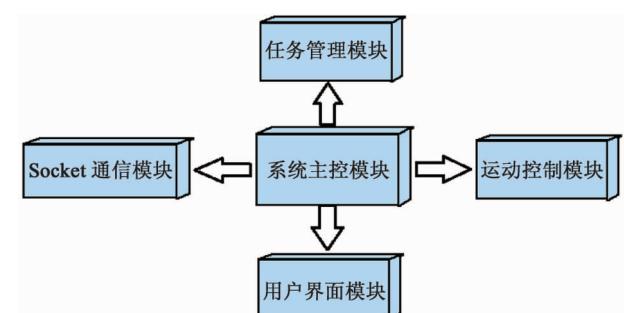


图 7 直接示教系统功能模块结构图

系统主控模块是系统的核心控制程序, 负责系统三个工作模式的切换和各子程序的调用。系统由

示教盒上的按键实现工艺流程,主控模块调用 getkey( )指令检测示教盒上的按键,而操作人员则通过示教盒按键与主控程序进行交互。任务管理模块负责任务的创建和终止,在同一时间内可执行多个程序。本系统在不同的工作模式下需要运行不同的任务,控制任务创建和终止指令如下: void taskCreate string sName, num nPriority, program() void taskKill( string sName)。

其中:sName 为字符串数据,表示任务的名称; nPriority 表示任务优先级,数字越大优先级越高; program() 表示任务执行的程序代码。本系统中主要任务有系统主控任务、Socket 通信任务、用户界面任务等。

Socket 通信模块负责与 NetBox 进行通信,接收 ATI 力传感器检测得到的力/力矩值。Socket 通信任务在系统启动时就会被创建为同步任务,任务执行周期为 4ms,则程序每隔 4ms 获取力传感器发送的力/力矩值。

运动控制模块在等待/示教模式下使用 Socket 通信模块接收到的力/力矩值,应用基于速度的顺应性跟踪控制方法,控制机械臂跟随操作人员外力作用运动;复现模式下则复现示教过程记录的轨迹。本系统主要工作在位置控制模式和速度控制模式,TX90 默认为位置控制模式,此模式下可以调用 movel 等指令控制机器人运动。若要使 TX90 工作在速度控制模式下,需要支持 VAL3 addon 扩展函数库<sup>[11]</sup>,速度控制指令有: void \$velTool(Tool, mdesc) void \$setVelCmd( num cmd[ 6 ] )。\$velTool( Tool, mdesc ) 初始化速度控制模式,其中 Tool 为工具坐标系 {T},作为机械臂运动的参考坐标系,运动描述符 mdesc 限制速度和加速度的最大值;\$setVelCmd( num cmd[ 6 ] ) 用来设定机械臂的运动速度,其中 cmd 为包含 6 个元素的数组,分别为 x, y, z 轴下的平移速度( mm/s ) 和 绕 x, y, z 轴旋转速度( deg/s )。

用户界面模块是控制程序与操作人员的交互窗口,能够在示教盒上显示力/力矩值、当前状态以及当前工作模式等信息,并通过用户界面执行操作。

#### 4.2 等待模式程序设计

等待模式下示教盒界面如图 8 所示。等待模式

下操作人员可以通过示教盒监控力传感器检测值,由于工具的重力作用,使力传感在不受外力时检测值也不为零。ATI 力传感器为解决重力补偿问题提供了简便的解决方法,控制器 CS8C 与 NetBox 通讯时,只要控制器发送的请求报文段中相应字段为 1,就可以将此时传感器数值置零,消除重力影响。等待模式下,操作人员首先按下 F1 对传感器置零,然后牵引机械臂工具至示教起点,准备开始示教;按下 F2 则系统进入示教模式,若想退出直接示教系统则按下 F8 结束程序。

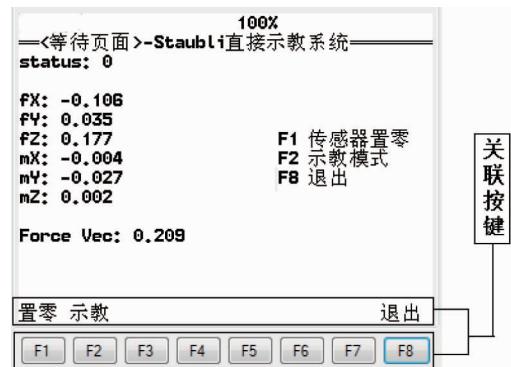


图 8 等待模式界面

#### 4.3 示教模式程序设计

在等待模式,按下 F2 进入示教模式,界面如图 9 所示。此时,机械臂工作在速度控制方式,操作人员可牵引机械臂工具执行任务,程序定周期调用 here() 指令反馈机械臂工具末端位置并存储,直至按下 F1 停止采集位置点,记录机械臂的示教轨迹,

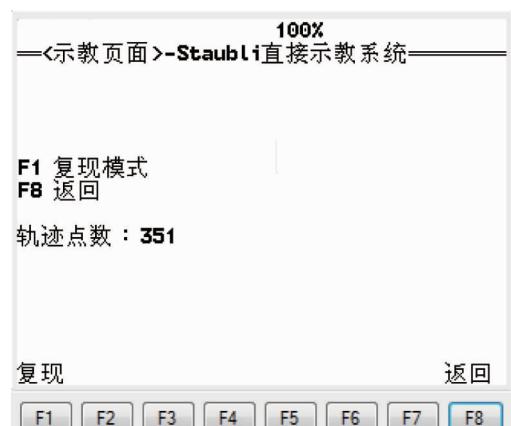


图 9 示教模式界面

进入复现模式;若示教任务中遇到问题可按下 F8 返回等待模式,重新牵引机械臂至示教起点,准备就绪后再进入示教模式。

#### 4.4 复现模式程序设计

Stäubli 机器人系统默认为位置控制,为了使机械臂工作在笛卡尔速度控制模式调用 \$velTool(Tool, mdesc),当 Stäubli 机器人系统要切换回位置控制时需调用指令 resetMotion(),该指令停止机器人手臂在轨迹上的运动,并取消所有已经保存的运动命令。当进入复现模式,示教盒界面如图 10 所示,程序调用 resetMotion() 切换回位置控制模式,按下 F1 开始复现轨迹,此时程序自动读取内存中存储的位置坐标点控制机械臂复现示教过程的路径;按下 F8 可返回等待模式,程序调用 \$velTool(Tool, mdesc) 切换到速度控制模式,系统又可开始新任务的示教和复现过程。

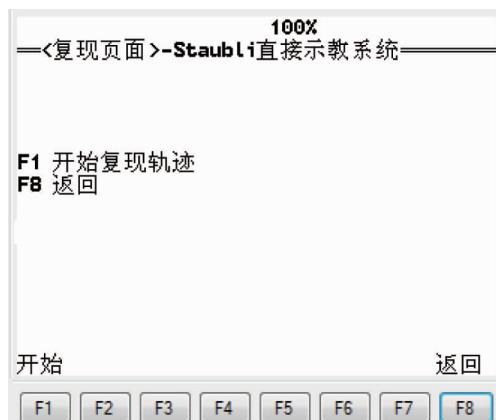


图 10 复现模式界面

其中示教得到的轨迹存储在笛卡尔坐标数组 Position 中,轨迹点数为 nPoint,使用 while 循环读取记录的轨迹点,控制机械臂复现示教得到的轨迹。

#### 5 试验及结果

本文的试验对象为 Stäubli TX90 工业机器人,腕部安装 ATI 力传感器测量外部牵引力,试验场景示意如图 11 所示。工作空间中放置了一个工件 (workpiece),机械臂工具末端期望轨迹为沿着工件外壁运动。操作人员牵引机械臂工具在 XY 平面内作图中的试验轨迹, Z 轴方向位置保持不变,试验轨迹点采集间隔为 0.04s,共存储 351 个轨迹点,原始轨迹如图 12(a)所示;应用 Douglas- Peucker(DP) 算法后,结果如图 12(b)~(d)所示;在图 12(b)中阈值 t 为 0.5mm,图中红圈代表 DP 算法得到的 25 特征点,连接特征点获得的轨迹与图 12(a)所示轨迹最大误差小于 0.5mm。随着阈值 t 增大,图 12(c)~(d)中删除的冗余轨迹点增多,保留的特征点变少,压缩算法得到的轨迹与原轨迹差别增大。

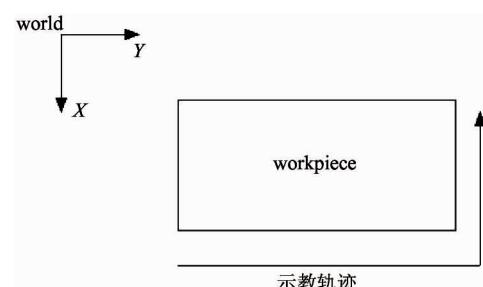
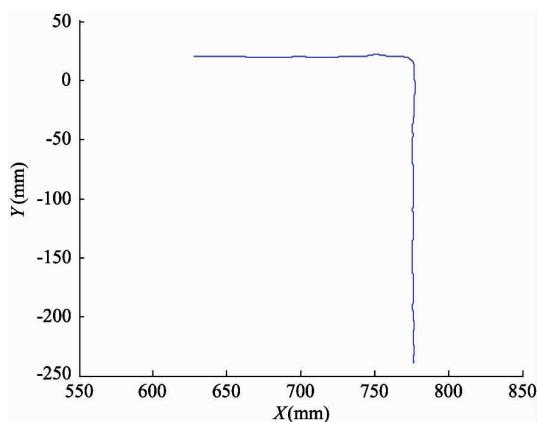


图 11 实验场景示意图

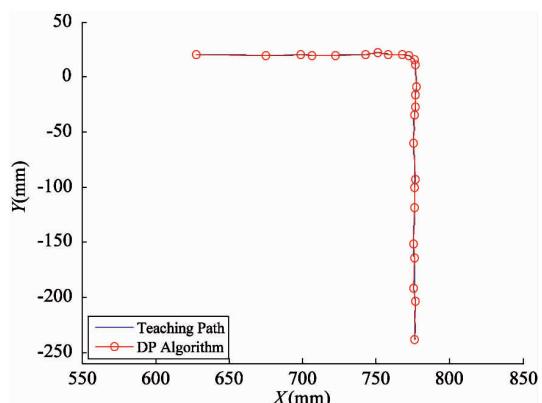
复现路径运动控制代码如下:

```
{
while i < nPoint
    //开始复现记录的路径
    movel(Position[i], tTool, mNomSpeed)
    i = i + 1
endWhile
//等待运动完成
waitEndMove()
}
```

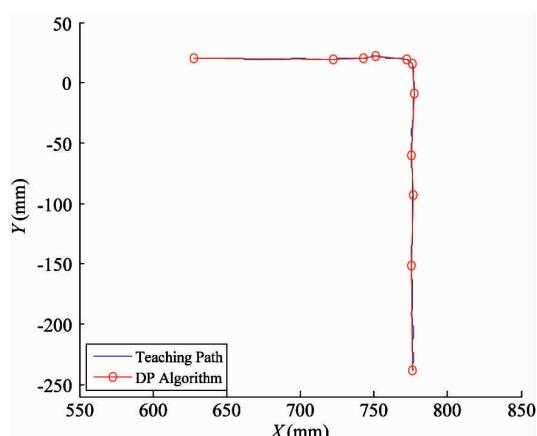
示教-复现过程如图 13 所示。首先启动系统进入等待模式,操作人员牵引机械臂运动至示教起点,如图 13(a)所示;接着切换至示教模式,操作人员牵引机械臂执行示教任务,生成示教轨迹如图 12 所示;进入复现路径模式,此时机器人也由速度控制模式切换至位置控制模式;机械臂首先运动至示教起点,如图 13(e)所示;接着按图 12 所示示教轨迹进行复现。图 13(a)~(d)与图 13(e)~(h)表明轨迹示教-复现的对应关系。



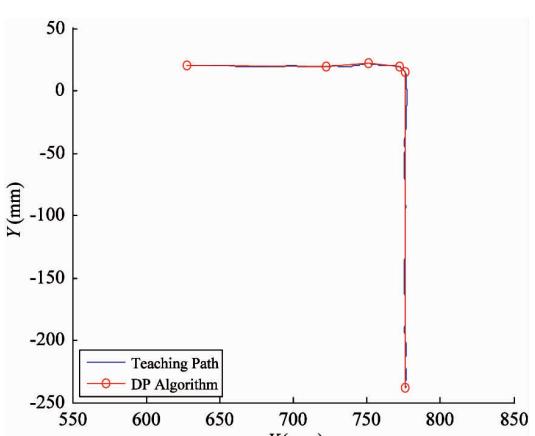
(a) 示教存储的原始轨迹



(b) 阈值  $t = 0.5 \text{ mm}$ , 特征点数  $n = 25$



(c) 阈值  $t = 1 \text{ mm}$ , 特征点数  $n = 11$

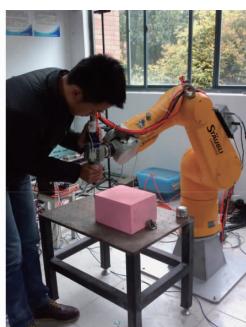


(d) 阈值  $t = 2 \text{ mm}$ , 特征点数  $n = 6$

图 12 示教轨迹生成



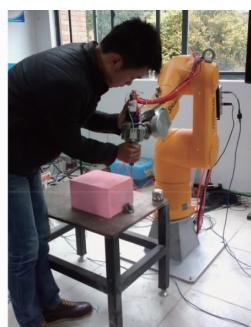
(a) 示教步骤1



(b) 示教步骤2



(c) 示教步骤3



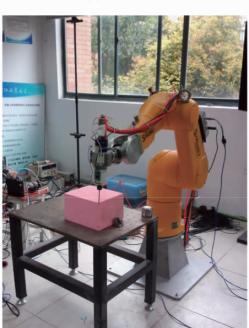
(d) 示教步骤4



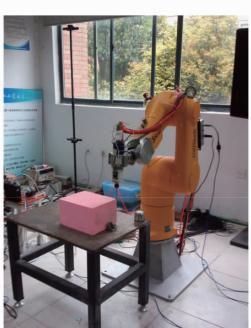
(e) 复现步骤1



(f) 复现步骤2



(g) 复现步骤3



(h) 复现步骤4

图 13 示教-复现过程图

## 6 结 论

基于 Stäubli 工业机器人开发了直接示教系统,该系统通过在机械臂腕部安装力传感器来“感知”操作人员的运动意图。研究了基于速度调节的顺应性跟踪控制方法,实现了机械臂对牵引力的顺应性跟踪。系统能够在操作人员执行示教任务时,定期采集并存储位置坐标点,应用 Douglas-Peucker 矢量数据压缩算法,去除那些冗余轨迹点,最终生成示教轨迹。由于使用 VAL3 机器人语言设计直接示教模块,基于示教盒实现直接示教系统的流程控制、数据监控和按键响应等功能,简化了示教过程,降低了使用工业机器人的技术门槛。

### 参考文献

- [ 1 ] 胡建元, 黄心汉. Movemaster-EX 机器人零力跟踪控制. 华中理工大学学报, 1993, 21(6): 135-139
- [ 2 ] 吴威, 吴桂满. 焊接机器人在线示教. 焊接学报, 1995, 16(1): 16-19
- [ 3 ] Kushida D, Nakamura M, Goto S, et al. Human direct teaching of industrial articulated robot arms based on force-free control. *Artificial Life and Robotics*, 2001, 5 (1): 26-32
- [ 4 ] Asada H, Izumi H. Automatic program generation from teaching data for the hybrid control of robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(2): 166-173
- [ 5 ] Li C J, Park C, Kyung J, et al. Study on teaching path reconstruction algorithm based direct teaching and playback method. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Incheon, Korea. 2011, 778-779
- [ 6 ] Park C H, Kyung J H, Do H M, et al. Development of direct teaching robot system. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Incheon, Korea. 2011, 730-732
- [ 7 ] 张宇, 游有鹏. 直接示教机器人全数字控制系统设计. 机械与电子, 2013 (3): 57-60
- [ 8 ] Choi M H, Kim S J. A force/moment direction sensor and its use for human-robot interface in robot teaching. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Nashville, USA, 2000: 2222-2227
- [ 9 ] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *Cartographica*, 1973, 10(2), 112-122
- [ 10 ] 史陶比尔. Val3 语言程序设计参考手册. 第 7 版, 2012
- [ 11 ] 史陶比尔. Val3 addon 扩展函数库说明书, 2013

## A direct teaching system of industrial robots based on compliant tracking control

Xu Jianming, Ding Yi, Yu Xinyi, Yu Li

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

### Abstract

The direct teaching problem of robots was studied, and a direct teaching system was developed on the Stäubli TX90, an industrial robot. A velocity adjusting-based compliance tracking control method was applied to the system, so it can adjust the reference velocity of the manipulator by the force controller to achieve the manipulator's compliant traction tracking. In the meantime, the system periodically collects and stores the manipulator trajectory, and removes redundancy tracing points, the system periodically applies the Douglas-Peucker vector data compression algorithm to generate a teaching path. The direct teaching program module was designed based on the VAL3 robot language, and it was embedded in the Stäubli industrial robot teaching system. Finally, the effectiveness of the developed direct teaching system was verified through the experiment.

**Key words:** compliance tracking control, directly teaching, industrial robot