

doi: 10.7690/bgzdh.2018.03.020

工业机器人人机交互系统的综合评价和实证分析

杭丽滨¹, 周德红¹, 李玉霞²

(1. 东华大学人文学院, 上海 201620; 2. 上海智殷自动化科技有限公司, 上海 201114)

摘要: 针对目前成熟的评估方法难以对工业机器人人机交互系统进行综合评价的问题, 提出一种交互性能 4 维指标综合评价体系。对工业机器人交互系统的交互功能和交互性能进行描述, 并对 ABB、川崎和 UR 3 种典型机器人的示教过程做了初步的交互系统综合评价。结果表明: 该系统有一定的指导价值, 可为工业机器人人机交互系统的研究提供新的方法。

关键词: 工业机器人; 人机交互系统; 综合评价; 实证分析

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Comprehensive Evaluation and Empirical Analysis of Human-computer Interaction System of Industrial Robot

Hang Libin¹, Zhou Dehong¹, Li Yuxia²

(1. College of Humanities, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Gene Automation Technology Co., Ltd., Shanghai 201114, China)

Abstract: It is difficult for the present mature assessment method comprehensively evaluating the human-machine interaction system of industrial robot, an interaction comprehensive evaluation system with 4 dimensional index is proposed. The industrial robot interaction system and interaction function are described. And the ABB, Kawasaki and UR robot teaching process are preliminarily evaluated by an interaction comprehensive evaluation system. The results show that the system has a certain guiding value and can provide a new method for the study of the human-computer interaction system of industrial robots.

Keywords: industrial robot; human-machine interaction system; comprehensive evaluation; empirical analysis

0 引言

随着工业机器人在中国市场的快速成长, 工业机器人产品进入更广泛的生产和生活领域, 其人机交互系统已经越来越受到关注, 人机交互系统的性能和体验已经成为它发展中一个重要的方面, 但是如何结合具体的产品对它进行综合评价, 并能指导工业机器人人机交互系统的研究仍然比较困难。基于此, 笔者尝试建立工业机器人人机交互系统的综合评价系统, 并对 ABB、川崎和 UR 3 种典型工业机器人的示教过程进行了综合评价。

1 工业机器人人机交互系统的评价系统综述

工业机器人是现代智能制造的核心部件, 正在工业、服务领域快速增长, 同时正在从一个少数专业人员使用的设备转变成一个可以在工厂和某些服务行业中被大多数技术人员和操作人员使用的设备。作为仍需要大量专业人员与其交互的设备, 对工业机器人的人机交互系统进行研究和评价, 提高它的交互功能和性能, 是工业机器人发展中的一

个重要课题。

对工业机器人系统进行单独的人机交互研究的文献相对较少, 且集中在交互的安全性^[1]和图形化编程^[2]等方面。对服务机器人和特种机器人的人机交互研究相对较多, 多集中在多传感交互^[3]、语言交互^[4]和自然交互^[5]等方面, 这些研究由于在可靠性方面的限制, 短期内不可能直接应用到工业机器人领域。

现在的工业机器人种类繁多, 由不同的国家、不同的研发团队开发实现, 尽管其功能类似, 但是在交互系统上差别还比较大。如何对这些交互系统进行综合评价和比较成为对这一领域研究的一个关键问题。人机交互学中对交互系统的评价和比较的研究相对较多, 比较主流的方法是以用户为中心的设计和评估^[6], 通过用户测试和专家评审的方法进行评估。该评估方法在电脑、pad 和手机等设备上应用比较广泛; 在工业和自动化领域也有一些研究, 比较典型的方法有使用符号学^[7]和 Fitts' 定律法定量化研究^[8]。

收稿日期: 2017-11-30; 修回日期: 2017-12-25

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(15111101703)

作者简介: 杭丽滨(1972—), 女, 江苏人, 博士, 从事符号学与人机交互、新媒体传播研究。

相对其他大多数设备, 工业机器人的人机交互系统更复杂。人与机器人的交互过程主要包括几大功能场景: 1) 人把机器人需要完成的任务通过编程和示教的方式下达给机器人, 并通过测试和验证的手段确保任务被准确地下达给机器人; 2) 通过简单的交互界面, 让机器人不断重复下达的任务和功能, 人只需要少量地交互来处理交互过程的异常和变化; 3) 机器人设备需要变换工作任务或者设备出现故障需要进行调整和维护。

应用目前成熟的评估办法很难对这样的交互系统进行评价, 笔者提出一种基于多维指标的综合

评价体系, 对工业机器人的人机交互系统和典型示教过程进行了综合评价和比较, 并对几种典型机器人的交互系统进行了比较研究^[9]。

2 典型工业机器人交互系统基本功能比较

工业机器人的核心交互设备是示教器, 机器人的主要交互操作都是通过示教器进行的。根据市场上示教器的特征, 笔者选用欧系的 ABB、日系的川崎 KAWASAKI 和协作机器人的优傲 UR 为主要研究对象, 这 3 种示教器的主要物理特征如图 1 所示。



图 1 3 种典型的示教器的物理特征

这 3 种示教器的共同特征是都有一个彩色的触摸屏, 大多数的动态交互信息过程都是通过这个触摸屏来实现, 属于 WIMP (Windows、Icon、Menu、Pointing Device) 交互方式的范畴^[7]。除此之外, 这 3 种示教器都提供了一定数量的硬件操作按键实现既定的固定功能, ABB 有 12 个功能按键, 川崎有将近 60 个功能按键, UR 仅有一个电源按钮; 其中最大的差别是手动机器人的交互设备, ABB 使用 3 维的摇杆, 川崎使用功能按键, UR 使用触屏软按钮, 如图 1 所示。

机器人示教器是人与机器人交互的主要设备和终端, 涵盖了机器人使用过程中不同用户的各种功能需求。如图 2 所示, 这些用户一般被分成 4 类: 1) 系统集成工程师, 完成机器人和其他外设的配置集成, 包括机器人零点校准和系统外设的参数配置; 2) 编程人员, 在已经配置好的系统上针对具体任务进行编程、示教和调试, 完成既定任务的程序化; 3) 生产操作人员, 只负责整个任务的启停和类似于上下料操作等的中间交互; 4) 系统维护工程师, 当系统出现故障后, 对系统进行故障诊断和维修维护。

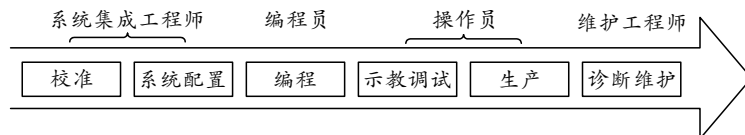


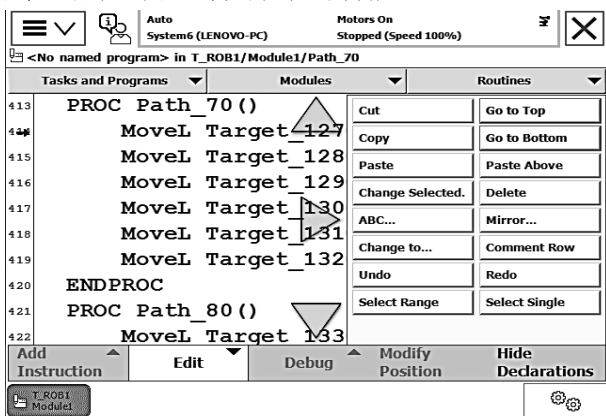
图 2 机器人示教器典型用户和其功能分类

在所有这些使用的用户和功能中, 编程人员的编程、示教和调试是最关键的一环。编程人员的主要任务是使用示教器提供的界面和接口, 把工艺过程录入到机器人程序系统中, 最后形成可以控制机器人自动执行的程序。所编程序的功能很大程度上取决于机器人系统所提供的编程语言系统。ABB 和川崎的编程指令系统都提供了丰富的指令和函数, 数量都是 500 左右, 能够涵盖大多数应用的需

求。ABB 编程语言采用类 C 语言的语言架构, 提供丰富的程序架构和灵活的调用机制; 川崎的编程语言采用类 BASIC 语言的语言架构, 提供简单子程序调用和基本参数传递机制。ABB 和川崎的程序语言功能类似, 但是 ABB 的编程语言更容易支持结构复杂的程序, 川崎语言结构相对简单, 便于初学者掌握。UR 采用脚本语言形式, 提供近百的基本函数指令, 在码垛、上下料等应用中提供了丰富的指

令支持，对其他应用的支持相对较少。在编程中，对逻辑控制功能的支持是一个很重要的功能，这 3 种系统都支持后台的逻辑任务执行，ABB 采用多任务的后台程序执行逻辑控制，川崎采用分离的过程控制程序来实现逻辑控制，而 UR 采用多线程的方式实现后台的逻辑控制功能。

针对程序的编辑功能，最关键的步骤是程序指令和函数的输入。图 3 列出了 3 种示教器提供的程序指令输入的界面，都提供了可分类选择不同程序指令，然后添加到程序中的功能。



(a) ABB 指令输入



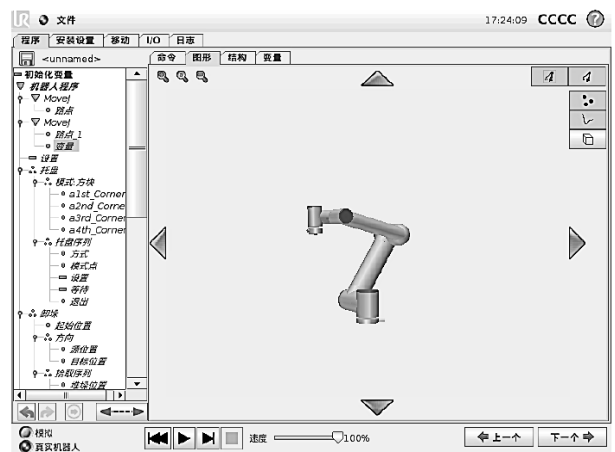
(b) 川崎指令输入



(c) UR 指令输入

图 3 程序指令或函数的输入界面

在程序编辑过程中最大区别是程序的显示方式：ABB 和川崎都提供了基于文本的程序显示，如图 3(a)和图 3(b)所示，但是 UR 提供了基于图形显示和图形化参数页面为基础的树状列表式程序显示，把程序的执行过程和逻辑以树状图形化的方式显示，方便没有编程语言基础的人学习使用，如图 4 所示。



(a) UR 程序显示和图形页面



(b) UR 程序显示和参数页面

图 4 UR 程序显示

从上面的交互系统功能分析可以看出，机器人系统的功能强弱很大程度取决于他们编程语言的功能和结构。总体来说，这 3 种机器人在基本的运动控制和通用应用控制上功能相似度极高，只是 UR 在应用支持上要弱一些。

在功能差异相对较小，交互和使用过程差异很大的框架前提下，系统分析和研究这些机器人的人机交互系统性能就显得尤为重要。

3 典型工业机器人交互系统的交互性能分析

3.1 交互任务的场景分析

就示教过程而言，触摸屏的使用居于核心地

位，绝大部分的示教功能通过触摸屏实现；因此，为了对这 3 种系统进行综合评价，笔者把触摸屏上所有的元素进行分类和统计。笔者把完成一个标准的示教流程作为交互目标，来统计与触摸屏相关的所有要素，主要方法如下：

1) 建立交互任务。

交互任务就是在实现一个标准的示教流程中，需要主要操作步骤，以 ABB 为例，需要开机，进入导航页面，进入示教主页面进行示教，但在示教中，还分解成机械单元选择、动作模式选择、工具坐标选择、工件坐标选择、载荷选择、操纵杆选择和增量模式等 7 项，在这 7 项中，可能还涉及到不同操作方式。以工具坐标选择为例，既可以直接默认系统工具参数完成工具坐标选择，又可以通过编辑或新建的操作方式进行参数配置。这 3 种操作方式所涉及到的下一级交互任务和界面元素完全不同。笔者对每一项交互任务中的每一种操作方式都进行了分析。

2) 建立触摸屏分析指标^[10]。

界面：人机界面是指人和触摸屏在信息交换和功能上接触或互相影响的领域，在这里就是指能够提供信息，对功能实现有影响的触摸屏整体。笔者统计了每一项交互任务完成所涉及到的界面总量。

符号：符号指在界面上出现的具有意义，反馈信息的记号，主要分为以下几类：

- ① **Button**: 界面上的按键，通过下压方式控制人机交互显示的输入设备，一个 button 算一个符号；
- ② **Label**: 界面上的标签，只能显示信息，不能修改信息，一个 label 算一个符号；
- ③ **Stack**: 界面上线性表，它可能有若干 item 和列，符号量比较大，但是在使用中通常一个 stack 默认它作为一个整体提供数据信息；
- ④ **Table**: 界面上出现的数据列表，单位为 item 和列，列表中每一个数据都提供单独的信息，算一个符号，如果 table 中元素数量由系统文件决定，就计算最小值；

3) 操作工作量。

在标准示教流程中，笔者观察了操作过程中的必须步骤，并进行了统计，主要包括点击和编辑。

⑤ **下拉框**: 界面上出现的下拉菜单，一条算一个符号，如果数量不定，就计算最小数量；

⑥ **Text edit**: 界面上的文本编辑器，一个 Text edit 算一个数量；

⑦ **Check box**: 界面上的勾选框，一个 check box 算一个符号；

⑧ **文件浏览器**: 符号数量根据系统文件决定，计算最小值；

⑨ **3D 动态视图和 3D 动态标尺**: 是 UR 所特有的，动态视图或标尺实时显示机器人状态，一个动态视图或一个标尺算一个符号。

符号数量：笔者以交互任务为单位，统计不同操作模式下所涉及到的符号数量，从而得到在一个标准示教流程下，所需要的总符号数量。

符号种类：与符号数量类似，讨论一个标准示教流程，一共需要多少种符号。

可编辑参数：统计可通过触摸屏配置的参数总量。在统计参数总量的同时，还考虑了参数的层数。

以 UR 的界面为例，笔者统计了每一个交互任务中所有的符号种类、符号总数、总可编辑参数的个数和界面数，如表 1。

表 1 UR 机器人示教过程的交互分析

交互任务	符号种类	符号总数	可编辑参数	界面数
1 开机	2	10	0	1
1.1 设置机器人	2	12	0	1
1.1.1 初始化	4	21	1	2
1.1.1.1 加载安装设置	5	14	3	2
1.1.1.2 配置 TCP	5	40	12	6
1.1.1.2.1 位置	2	10	0	1
1.1.1.2.2 方向	3	8	0	1
1.1.1.3 配置安装参数	3	19	2	1
1.2 运行程序	4	23	0	4
1.2.1 移动	6	75	12	7

在此基础上，笔者能够求得符号种类的总量、符号的总数、编辑参数的总量和界面的总量，如表 2 所示。ABB 和川崎也用了同样的方法，得到的总量如表 2。

表 2 交互分析总量统计

种类	硬件按键数量	软件符号种类	符号总数	编辑参数	界面数
川崎	58	6	261	97	15
UR	1	7	232	30	26
ABB	12	6	396~652(可做不同选择)	75~128(可做不同选择)	17~63(可做不同选择)

统计了每一个交互任务中的每一种交互任务，操作动作的总量和编辑符号的总量，然后累加，形成的操作动作总量和编辑符号的总量，如表 3 所示。

表3 操作总量的统计

种类	点击数	编辑符号
UR	12	0
川崎	10	0
ABB	14	0~50

3.2 工业机器人交互系统4维性能指标评价体系

人机交互系统最重要的一种衡量指标是人机交互的可用性。对于可用性的概念，研究者们提出了多种解释。Hartson (1998)认为可用性包含2层含义：有用性和易用性。有用性是指产品能否实现一系列的功能；易用性是指用户与界面的交互效率、易学性以及用户的满意度^[11]。Hartson的定义比较全面，但对这一概念的可操作性缺乏进一步分析。Nielsen(1993)的定义弥补了这一缺陷，他认为可用性包括以下要素：1) 易学性：产品是否易于学习；2) 交互效率：即用户使用产品完成具体任务的效率；3) 易记性：用户搁置某产品一段时间后是否仍然记得如何操作；4) 出错频率和严重性：操作错误出现频率的高低及严重程度；5) 用户满意度：用户对产品是否满意。Nielsen认为产品在每个要素上都达到很好的水平，才具有高可用性^[11]。

由于目前主流的工业机器人，它们的功能性即有用性在总体上类似，都能完成90%以上的应用需求，所以对工业机器人来说，易用性是评价人机交互性能的关键指标。评估机器人交互系统的易用性，不仅要易学性、易记性、交互效率、易错性、用户满意度进行衡量，而且要和整个系统的设计指标进行关联，从而从设计原则的角度评价系统的易用性。为此，笔者提出了一种基于设计指标的易用性体系，即工业机器人交互系统4维性能指标评价体系：

1) 系统的符号复杂度，包括符号的种类和符号的总体数量，从而来衡量系统的易学性和易记性；

2) 操作的关联度，指完成一个具体操作和功能是需要关注信息的种类和总量，从而衡量系统的易记性和出错频率；

3) 操作的深度，指完成一个具体的功能及操作需要在几种不同的界面和环境切换才能完成；

4) 操作工作总量，完成一个具体的功能和操作需要点击次数加上编辑符号的数量，从而衡量系统的交互效率。

系统符号复杂度的计算方法如式(1)，是把系统中使用的每种符号的数量 A_i 通过加权累加，每一项乘以一个动态调整系数 k_i 把符号本身的复杂度作动态调正(如果符号的数量很多，但是很容易辨识就适当地调低整个系统的复杂度)。

$$\text{系统复杂度 } C = \sum_{i=0}^n k_i A_i \quad (1)$$

以川崎机器人为例，由于硬件按钮相对简单，动态修正系数为0.3；软件按钮相对复杂，动态修正系数为0.5；参数比较复杂，动态修正系数设为0.8；界面最复杂，动态修正系数为1，所以根据表2川崎机器人的系统复杂度为：

$$C_{\text{川崎}} = 58 \times 0.3 + 261 \times 0.5 + 97 \times 0.8 + 15 = 240.5 \quad (2)$$

类似，笔者也可以得到ABB和UR的复杂度分别为495和166.3。

在操作的关联度和深度的统计上，笔者首先梳理了每种机器人交互任务的结构，然后比较相似操作的关联度和深度，以川崎机器人为例，结构如表4所示。

表4 川崎机器人单功能界面和环境结构

川崎机器人交互任务的结构			
1、开机			
2、示教机器人(界面)			
2.1	主界面		
2.2	简易示教设定	2.2.1	速度设定
		2.2.2	精度设定
		2.2.3	计时器设定
		2.2.4	工具登陆设定
		2.2.5	AS语言模式设定
		2.2.6	辅助一体型命令设定

根据表4可知：川崎机器人在简易示教中需要修改6类相关参数，它在示教过程中的关联度是6，其他部分的关联度都是零。由于所有的操作都只需要切换到一级子界面就可以完成，所以它的操作深度为1，如表5所示。

表5 川崎机器人的单功能关联度和深度分析

分析对象	开机	辅助界面	简易示教设定
关联度	0	0	6
深度	0	1	1

使用和式(1)类似的方法，可以把系统的关联度表达为主要功能操作关联的信息总量 A_i 乘以动态修正系数 k_i 的加权累加；系统的操作深度也可以表达为主要功能操作深度 A_i 乘以动态修正系数 k_i 的加权累加。

对川崎机器人来说，所有的子功能关联度都是界面的切换，所以动态修正系数都为1。从而，川崎机器人的总关联度和深度分别为6和2。用类似的方法得到ABB机器人的总关联度和深度分别为8和6；UR机器人的总关联度和深度分别为6和1。

对于操作工作的总量是把主要功能的点击数量和编辑符号的数量做简单累加。使用表3中的数据可以得到川崎、UR、ABB机器人的操作复杂度分别10、12、20(由于ABB的编辑符号大多数都是

可选操作，在这里只取一个平常操作方式)。另外，由于 ABB 的摇杆操作不需要在不同功能按键间切换，操作的工作总量将有所减少，总量减少 5，最终确定值为 15。

笔者把所有的评价数据放在一起，得到表 6 中的数据。

表 6 3 种工业机器人的 4 维评价表

种类	符号复杂度	操作关联度	操作深度	操作工作总量
川崎	240.5	6	2	10
UR	166.3	6	1	12
ABB	495	8	6	15

由于这 4 个维度的数据不是同一个数量级别，将每一项取平均值，然后去除原始值，最后乘以 100，得到归一后的数值。以归一后的数值做雷达图，可得到这 3 种系统的人机交互 4 维综合评价如图 5。

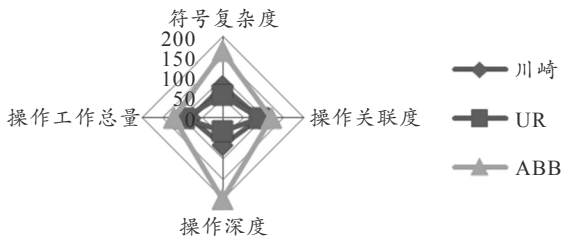


图 5 3 种机器人人机交互示教交互 4 维综合评价

4 结论

笔者针对工业机器人的人机交互系统进行综合评价，对工业机器人交互系统的交互功能和交互性能进行描述，通过量化的方式提出了一种交互性

能 4 维指标综合评价体系，并尝试对 ABB、川崎和 UR 3 种典型机器人的示教过程做了初步的交互系统综合评价，得出了一些有设计指导价值的数据和结论，为工业机器人人机交互系统发展提供了新的尝试和视角。

参考文献:

- [1] 吴海彬, 杨剑鸣. 机器人在人机交互过程中的安全性研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 79.
- [2] 周青松. 30 喷涂机器人人机交互及离线编程系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 1-5.
- [3] 马琼雄. 基于视觉的服务机器人人机交互技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 1-15.
- [4] 李金厚. iRobot——一种基于类自然语言人机交互系统的初步研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 1-15.
- [5] 马风力. 基于 Kinect 的自然人机交互系统的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 1-7.
- [6] 董建明. 交互: 用户为中心的设计和评估[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2010: 233-301.
- [7] 张向波. 基于符号学的人机交互分析方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003: 12-55.
- [8] 魏先民. 人机交互领域中 Fitts'定律研究[J]. 制造业自动化, 2012, 34(6): 82-83.
- [9] 杨磊, 宋欣, 胡文韬, 等. 预警勘探机器人的设计与试验[J]. 兵工自动化, 2016, 35(5): 84-87.
- [10] 杜树标, 蒋韦韦, 丁洋. 环境机器人现状及关键技术分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016(5): 93-97.
- [11] 刘颖. 人机交互界面的可用性评估及方法[J]. 人类工效学, 2002, 8(2): 35-38.