

◎模式识别与人工智能◎

基于自然语言的分拣机器人解析器技术研究

熊志恒, 闵华松

XIONG Zhiheng, MIN Huasong

武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 武汉 430081

Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

XIONG Zhiheng, MIN Huasong. Research on sorting robot parser based on natural language understanding. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(8): 113-119.

Abstract: Industrial robots usually adopt specific robot language to teach programming and controlling, which needs high professional skills for operators. In addition, longer period of teaching programming can reduce the efficiency. In order to raise the efficiency and the applicability of industrial robots, this essay presents a kind of design approach based on constrained natural language parser. By lexical parsing, grammar parsing and semantic parsing to constrained natural language, this system can get the needed working intent, afterwards, it matches with real-time producing three-dimensional semantic map. Combing manipulator trajectory planning, it eventually generates robot operating program that can finish the targets. Besides, it finishes parsing the robot operating program and controlling the actual manipulator. By doing experiment, it appears that the robot parser handled based on limited natural language in this essay can correctly parse natural language commands, finally can achieve the controlling to the manipulator.

Key words: constrained natural language; robot language; parser; trajectory planning

摘 要:工业机器人通常采用特定的机器人语言进行示教编程与控制,对于操作人员需要具有较高专业与技能要求,并且示教周期长导致工作效率降低。为了提高工业机器人使用效率与易用性,提出一种基于受限自然语言解析器的设计方法。该系统通过对受限自然语言进行词法解析、语法解析、语义解析,得到所需求的工作意图,然后与实时生成的三维空间语义地图进行匹配,结合机械臂轨迹规划,生成能够完成工作任务的机器人作业程序,并完成了机器人作业程序的解析与实际机械臂的控制。通过实验证明设计的基于受限自然语言处理的分拣机器人解析器能够正确解析自然语言命令,实现对机械臂的控制。

关键词:受限自然语言;机器人语言;解析器;轨迹规划

文献标志码:A **中图分类号:**TP39 **doi:**10.3778/j.issn.1002-8331.1509-0096

1 引言

机器人语言按照作业描述水平的程度分为动作级编程语言、对象级编程语言和任务级编程语言三类。

动作级编程语言是最低一级的机器人语言。它以机器人的运动描述为主,通常一条指令对应机器人一个动作。虽然编程简单,但是功能有限。对象级编程语言

是比动作级语言高一级的编程语言,用接近自然语言的方法描述对象的变化,是目前主流的机器人编程语言。但是其对工人的要求比较高,对不同的任务需要工人使用特定的语言进行程序的编写调试。任务级编程语言是比前两者更高一级的一种语言,也是最理想的编程语言。这类语言允许使用者对工作任务所要求达到的目

基金项目:国家自然科学基金(No.61175094)。

作者简介:熊志恒(1992—),男,硕士研究生,研究领域为嵌入式系统与智能机器人,E-mail:xzh-why@163.com;闵华松(1969—),男,博士,教授,研究领域为嵌入式系统与智能机器人。

收稿日期:2015-09-09 **修回日期:**2015-12-08 **文章编号:**1002-8331(2017)08-0113-07

CNKI网络优先出版:2015-12-21, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20151221.1546.010.html>

标直接下命令,不需要规定机器人所做的每一个动作的细节。只要按某种原则给出最初的环境模型和最终工作状态,机器人可自动进行推理、计算,最后自动生成机器人的动作^[1]。

目前,国内机器人语言解析器主要是针对已定义的机器人指令集手工编写的程序进行解析处理。华南理工大学王浩等人提出了一种基于XML、UML建模和设计模式理论的开放式机器人解释器的实现方法^[2]。周泽湘等人将解释器的整体架构分为前后端并进行了具体的构建,运用词法分析工具LEX和语法分析工具YACC构造了词法和语法分析模块^[3]。但是手工编写机器人代码工作量较大,当机器人工作环境发生变化时需要重新对机器人进行示教。

随着人工智能的发展,基于自然语言处理的机器人受到了国内外专家学者的广泛关注。Young Sang Choi等人研发的移动机器人EL-E能够帮残疾人取物品,但是其没有设置语音交互接口,只能通过修改机器人程序或者通过GUI修改参数来实现对机器人的控制^[4];Jonathan Connell等人研发的ELI机器人可以通过训练学习新的名词和动词,构建一张语义表,通过语音交互可以较好地识别出物体颜色、大小、位置等,从而实现抓取任务^[5];Cynthia Matuszek等人针对室内移动机器人研究了一种自然语言解析器,能将描述室内路径的自然语言翻译成类LISP的机器人控制语言(RCL),通过对路径指令的解析能在未知的室内环境到达目的地^[6]。国内李新德等人在研究汉语自然语言路径重建描述语言规律的基础上,通过建立移动机器人导航意向图,设计并实现了室内环境下基于受限自然语言的移动机器人视觉导航^[7],并提出了一种利用描述路径的自然语言直接绘出机器人运行路径的方法,采用基于组块的分析方法,提高了机器人对路径自然语言的理解^[8];浙江大学洪增林研究了基于知识库的服务机器人智能推理方法,并用于

理解人类的自然语言指令^[9];清华大学黄文炳、孙富春老师团队采用Kinect进行背景相减法和帧差处理法获取目标抓取点信息,利用基于工作空间的RRT算法完成机械臂的轨迹规划,实现目标抓取^[10];东南大学孟正大、戴先中老师团队以Motoman SDA10D拟人双臂机器人和Mitsubishi PA10机器人为例,研究了拟人臂机器人在家庭环境中的自主抓取^[11];靳国强等人针对智能服务机器人的任务规划,引入复合行动对行动语言C+进行了扩展,并实现了其求解系统。在扩展的行动语言C+中,复合行动被定义成一定条件下一系列基本行动的连续执行^[12]。

2 分拣机器人系统整体架构

构建模块化分拣机器人作业系统,需要通过与人与环境的交互,推理得到准确的命令意图,结合深度相机等传感器,完成3维物体与环境的建模,通过对空间点云物理解与识别,生成3维语义地图,将意图和语义地图结合,然后通过自然语言解析得到机械臂的轨迹规划,生成控制命令,操作机械臂完成精确作业。

考虑到计算量负载平衡,模块化机械臂智能感知与分拣作业系统采用三台嵌入式计算机作为系统计算核心。其中一台计算机连接Kinect摄像机,获取Kinect的数据进行处理生成场景地图文件,完成视觉识别功能;另外一台计算机连接麦克风和喇叭输出,进行语音交互与推理,为本系统的“大脑”;第三台计算机连接模块化机械臂,负责对自然语言的解析,并实现对机械臂的控制。模块化机械臂六个关节为串行连接,控制信息通过USB转CAN卡发送给六个关节控制器完成控制。模块化机械臂智能感知与作业系统组成结构如图1所示。

本文系统基于ROS分布式处理框架,结合实际的模块化机械臂平台,提出一种智能感知与作业体系结构,初步设计的软件体系结构如图2所示。该软件体系

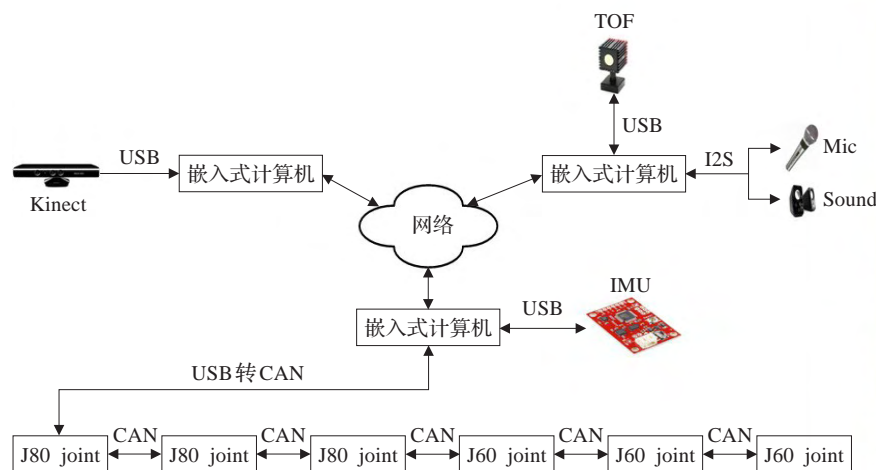


图1 模块化分拣机械臂系统硬件结构图



结构分为点云采集、物体识别、语音识别、语音合成、人际交互、自然语言解析、运动学解算和机械臂控制等几个部分, 每个部分设计成ROS下可执行节点(Node), 且在运行时松散耦合, 节点与节点之间进行基于主题(Topic)的异步数据通信。模块化机械臂智能感知与作业系统软件结构如图2所示。

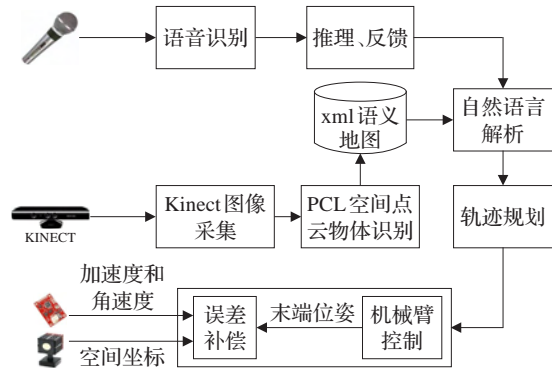


图2 模块化分拣机械臂系统硬件结构图

本文系统通过 Kinect 相机扫描工作场景, 实时构建系统多目标场景三维点云, 实现对多目标场景的整体理解, 构建可供机器人作业推理的三维语义地图描述文件; 通过语音交互、智能推理、反馈引导, 和机器人视觉识别得到的三维语义地图描述文件进行匹配, 得到用户期望, 将用户期望进行分析、推理, 生成用户的最终意图, 形成具有语义信息的解决方案; 然后通过对自然语言的解析和对机械臂运动学的求解, 得到最终的机械臂控制指令, 如图1所示。本文主要是针对自然语言的解析和对机械臂运动过程的求解。

3 机器人指令集

本文研究对象机器人采用模块化机械臂WUST-ARM, WUST-ARM属于6轴模块化机械臂。各个转动电机之间通过CAN bus进行通信, 控制主机和模块化机械臂之间通过USB转CAN接口实现它们之间的通信。

模块化机械臂WUST-ARM选用UNIVERSAL ROBOTS语言作为其编程控制语言, 该语言集包括变量、类型、流程控制语句、函数等。针对本文提出的分拣系统, 其主要使用UR语言中的移动控制函数来操作机器人实现对物品进行分类。针对本文系统中特定的机械手, 定义hand命令来控制手抓的开合, 定义timer函数来进行延时操作。表1中为本文主要使用的控制函数。

4 自然语言命令定义与处理

4.1 自然语言命令定义

汉语自然语言句子是由词或短语构成的语言单位, 能表达一个相对完整的意思, 能完成一次简单的交际任务, 在语音上有一定的语调, 表示陈述、疑问、祈使、感叹

表1 UR常用移动控制函数

move1(pose, a=1.2, v=0.3, t=0, r=0)	功能	Move to position
	pose:target pose	
	a:tool acceleration(m/s^2)	
	v:tool speed(m/s)	
	t:time(s)	
	r:blend radius(m)	
movep(pose, a=1.2, v=0.3, r=0)	功能	Move process
	pose:target pose	
	a:tool acceleration(m/s^2)	
	v:tool speed(m/s)	
	r:blend radius(m)	
	功能	控制抓手开闭
hand	on:开启抓手	
	off:闭合抓手	
timer	功能	在指定时间内停止动作
	参数	t:time(s)

的语气, 在书面上用句号、问好、感叹号表示出来。句子结构一般为:(定)主+[状]谓<补>+(定)宾^[13]。

对于机器人语言系统, 一般采用祈使句中的命令结构对其进行控制。表示命令的祈使句往往不带主语, 结构简单。针对本文提出的机器人语言系统采用了祈使句结构, 并且将谓语动词作为句子的中心词。

针对智能机械臂的特点, 定义一组自然语言微动作指令集, 微动作集由基本动作组成。每个基本动作对应一条机器人语言指令, 通过将每条自然语言命令进行解析, 得出基本动作, 然后与微动作集中指令进行匹配生成机器人语言控制指令, 从而可以实现机器人控制指令自动生成。

目前, 基于模块化机械臂WUST-ARM的硬件系统已经实现的基本微动作包括“抓取”、“移动”、“放下”。相应地定义与其对应的自然语言动作指令, 见表2。对于抓取动作解析成为两个步骤依次为“移动”、“抓起”。首先将机械臂末端移动到目标点, 对应的机器人控制指令为move系列指令; 解析“抓起”动作为hand系列指令。

表2 机器人动作指令集

动作指令	具体动作
抓取	将机械臂移动到目标点, 抓起目标物体
放下	将机械臂移动到目标点, 放下目标物体
放到	先执行抓取动作, 再执行放下动作

4.2 自然语言解析器

经典计算机编译器的设计一般分为七个部分, 分别为词法分析器、语法分析、语义分析、中间代码生成器、机器无关代码优化器、代码生成器、机器相关代码优化器, 其处理过程如图3所示^[14]。

参考经典的编译器工作流程, 本文中的自然语言解析器也分为了三大模块, 其中包括词法解析器、语法规解析器和语义解析器, 解析器整体流程如图4所示。

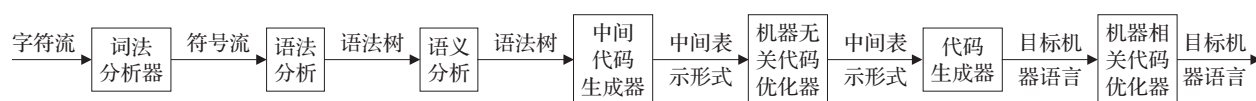


图3 经典编译器的工作流程

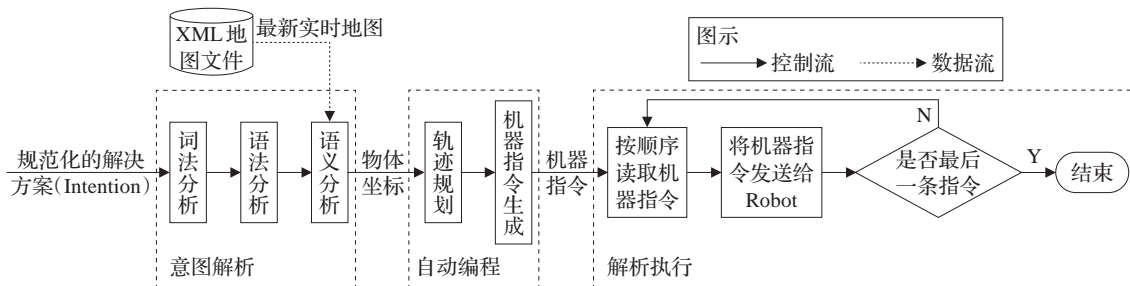


图4 自然语言解析器工作流程图

4.2.1 词法解析

基本的中文分词法一般包括最大正向匹配法(Maximum Matching Method),通常简称为MM法。其基本思想为:假定分词词典中的最长词有 i 个汉字字符,则用被处理文档的当前字串中的前 i 个字作为匹配字段,查找字典。若字典中存在这样的一个 i 字词,则匹配成功,匹配字段被作为一个词切分出来。如果词典中找不到这样的一个 i 字词,则匹配失败,将匹配字段中的最后一个字去掉,对剩下的字串重新进行匹配处理,直到文档被扫描完为止。

采用的中文分词法为逆向最大匹配法(Reverse Maximum Matching Method),通常简称为RMM法。其基本思想为:从被处理文档的末端开始匹配扫描,每次取最末端的 $2i$ 个字符作为匹配字段,若匹配失败,则去掉匹配字段最前面的一个字,继续匹配。RRM法使用的分词词典是逆序词典,其中的每个词条都将是按逆序方式存放。在实际处理是,先将文档进行倒排处理,生成逆序文档。然后,根据逆序词典,对逆序文档用正向最大匹配法处理即可。由于汉语中偏正结构较多,若从后向前匹配,可以适当提高精确度。

本文系统的词法分析主要是采用RMM法对自然语言进行分词处理,主要任务是将一句完整的自然语言语句分解成独立的单词,并且对其进行词性标注。将分词的结果组织成有意义的词素序列,对于每个词素,词法分析器产生的如下形式的词法单元作为输出:

<单词,词性,依存位置>

4.2.2 语法分析

在语法分析之前,定义一个语法预处理过程。在语法预处理过程中,将自然语言命令中的无关修饰词剔除。如对“把红色大苹果放到1号篮子”进行解析的结果中“把”只是“把”字句的祈使词,在自然语言处理中没有实际作用,将其剔除可以提高下一步构建语法树的效率。经过预处理后的自然语言命令只包括动词、名词、与名词相对的修饰词。

语法分析使用由词法分析器生成的各个词法单元的单词来创建语法树的中间表示。该中间表示给出了词法分析产生的词法单元流的语法结构。该树中每个内部结点表示一个单词,该结点的子结点表示该结点的属性。针对于本文系统自然语言命令的特点,可以将表示动作的动词作为整个命令的中心词,名词从属于动词,在语法树中表现为动作的子结点,而用来修饰名词的形容词从属于名词,在语法树中表现为名词的子结点,如图5所示。

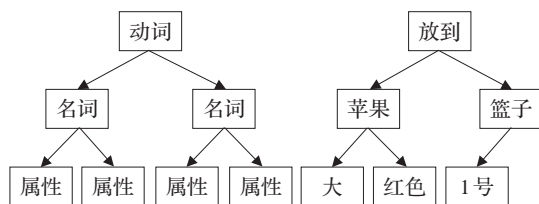


图5 语法树结构示例

4.2.3 语义分析

语义分析将已经生成的语法树和语义地图进行匹配来检查自然语言命令是否和语言定义的语义一致。本文通过使用Kinect相机扫描场景,将获取到的地图深度信息和颜色信息经过融合处理后生成三维点云数据(PCD)发布给pointcloud主题。然后经过处理、关键点提取、描述子提取,再通过物体特征数据库进行特征匹配得到三维场景语义地图描述文件。本文系统采用xml来构建语义地图,如图6所示。在该语义地图中可以按照规则添加目标对象,从而实现对系统实用性的扩展,语义分析匹配如图7所示。

将语法树中的结点与语义地图中的元素进行匹配,得到指定动作和目标物体坐标。将机器人从一个位置将物体取到另一个位置定义成一个复合行动。其具体过程为:首先,如果机器人和目标物体不在同一个位置,那么机器人移动到这个位置,然后依次执行抓取物体、移动到目标位置、放下物体的行动。而对于抓取、放下这两个动作则是复合行动的一个子集,只需执行指定的抓取、放下两个单一动作即可。

```
<?xml version="1.0" encoding="GB2312"?>
<RobotCaseVector>
  <case>
    <object> 1 </object>
    <Category> fruit </Category>
    <name> apple </name>
    <color> red </color>
    <shape> cuboid </shape>
    <coordinate> x y z </coordinate>
    <size> l w h </size>
  </case>
</RobotCaseVectot>
```

图6 xml语义地图

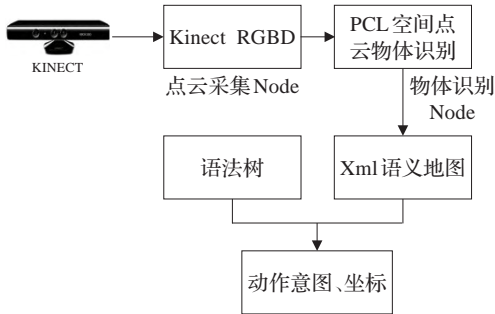


图7 语义匹配流程图

5 机械臂轨迹规划及指令生成

5.1 抓取作业描述

作业和机械手的运动可用手部位姿节点序列来规定,每个节点是由工具坐标系相对于作业坐标系的齐次变换来描述。相应的关节变量通过运动学逆解程序计算。

在本文系统中,要求机器人将物品分拣到指定位置,如图8所示。用符号表示沿轨迹运动的各节点的位姿,使机器人依次沿各点运动并作业。令 $P_i(i=0,1,2,\dots)$ 为夹手必须经过的路径点。参照这些节点的位姿将作业描述为如表3所示的手部的一连串运动和动作。

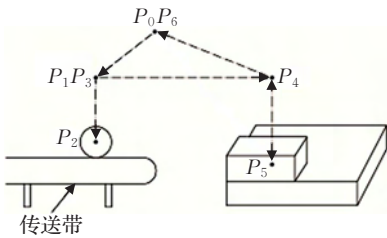


图8 机械臂WUST-ARM作业描述

在机械臂运动过程中从 P_0 点到 P_1 和 P_5 到 P_6 过程为了使机械臂平滑无抖动的移动到目标点可采用5阶多项式插补来进行轨迹规划,而对于其他过程由于是在同一平面可以考虑使用直线插补方式。

5.2 机械臂轨迹规划

机器人轨迹规划属于机器人底层规划,基本上不涉及人工智能问题,而是在机械手运动学和动力学的基础上,讨论在关节空间和笛卡尔空间中机器人运动的轨迹规划和轨迹生成方法。WUST-ARM机械臂连杆参数如表4所示。

表4 分拣机器人WUST-ARM连杆与关节参数

关节 i	$a_{i-1}/(^{\circ})$	α_{i-1}/rad	d_i/rad	$\theta_i/(^{\circ})$
1	-90	0	0.567 5	-90
2	0	0.15	0	-90
3	90	0	0	90
4	90	0	0.297 0	0
5	-90	0	0	0
6	0	0	0.224 5	90

在关节空间中进行轨迹规划,是将关节变量映射成时间的函数,并规划它的一阶和二阶时间导数;对关节进行插值时,应满足一定的约束条件。首先将路径点映射成各关节变量角度值,然后对每个关节拟合一个函数,使之从起始点开始,平滑运动最后达到目标点。为了生成平滑的轨迹,在插补点内,在保持位置和速度连续性的同时,为了防止机械臂抖动,还必须保证加速度不出现突变。为此必须设点起始点和终止点位置、速度和加速度的约束条件和边界条件:

$$\begin{cases} \theta(0)=\theta_0, \theta(t_{\epsilon})=\theta_{\epsilon} \\ \dot{\theta}(0)=\dot{\theta}_0, \dot{\theta}(t_{\epsilon})=\dot{\theta}_{\epsilon} \\ \ddot{\theta}(0)=\ddot{\theta}_0, \ddot{\theta}(t_{\epsilon})=\ddot{\theta}_{\epsilon} \end{cases} \tag{1}$$

其中, θ_0 表示在 t_0 时刻的起始关节角度, θ_{ϵ} 表示在 t_{ϵ} 时刻的终止关节角度。

本文利用五次多项式^[15]平滑函数。通过采用五次多项式进行插值,其轨迹的描述由起始点关节角度与终止点关节角度的一个平滑插值函数 $\theta(t)$ 来表示:

$$\theta(t)=q_0+q_1t+q_2t^2+q_3t^3+q_4t^4+q_5t^5 \tag{2}$$

此时多项式的系数应该满足:

$$\begin{cases} \theta_0=q_0 \\ \theta_{\epsilon}=q_0+q_1t_{\epsilon}+q_2t_{\epsilon}^2+q_3t_{\epsilon}^3+q_4t_{\epsilon}^4+q_5t_{\epsilon}^5 \\ \dot{\theta}_0=q_1 \\ \dot{\theta}_{\epsilon}=q_1+2q_2t_{\epsilon}+3q_3t_{\epsilon}^2+4q_4t_{\epsilon}^3+5q_5t_{\epsilon}^4 \\ \ddot{\theta}_0=2q_2 \\ \ddot{\theta}_{\epsilon}=2q_2+6q_3t_{\epsilon}+12q_4t_{\epsilon}^2+20q_5t_{\epsilon}^3 \end{cases} \tag{3}$$

根据上文提到的初始位姿和末端位姿,作如下定

表3 物品的抓取过程

节点	P_0	P_1	P_1	P_2	P_2	P_3	P_4	P_5	P_5	P_4	P_6	P_6
运动	INIT	MOVE	HANDON	MOVE	HAND OFF	MOVE	MOVE	MOVE	HAND ON	MOVE	MOVE	HAND OFF
目标	原始	接近物品	开夹	到达	闭夹	提升	接近托盘	到达	开夹	提升	回复原点	闭夹

表5 各任务阶段插补方式

节点	P_0	P_1	P_1	P_2	P_2	P_3	P_4	P_5	P_5	P_4	P_6	P_6
插补	INIT	曲线	HAND ON	直线	HAND OFF	直线	直线	直线	HAND ON	直线	曲线	HAND OFF

义, q_0 为初始姿态下的关节角, q_1 为末端姿态下的关节角;同时设定边界速度 pd_0 、 pd_1 为0,采用50个插补点 tv 。

$$q_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \tag{4}$$

$$q_1 = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6] \tag{5}$$

$$tv = 50 \tag{6}$$

$$qd_0 = qd_1 = 0 \tag{7}$$

通过上述公式(3)和限定条件(4)(5)(6)(7)可以求解出机械臂在50个插补点的关节角,从而可以得出机械臂的运动轨迹。

5.3 机器人指令生成

机器人指令结构如前所述主要包括有插补方式、目标位置点、速度、加速度、路径半径等。在通过手工示教编写机器人指令时,主要任务是确定示教点,同时确定合适的插补方式。本文中通过轨迹规划仿真得到了符合实际情况的机械臂运动轨迹,由此可以定义出与表3所示各阶段的插补方式,如表5所示。最终生成的运动指令如图8所示。

5.4 机械臂指令解析

为了实现对机械臂进行控制,需要将生成的UR语言转换成能够控制机械臂运动的控制指令。针对于WUST-ARM模块化机械臂,其由6个关节构成,针对每个关节分别控制,可将控制指令定义成6个关节的转动角, $\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]$ 。在轨迹规划阶段也是采用关节空间,即 θ 为50个插补点的关节坐标 $\theta(t)$ 。

对于图9中的UR语言,采用解释执行的方式。图10所示为解释执行流程。

NOP		
movep -0.080 0.331 1.450	%移动到目标点附近 P_1 点	
hand on	%打开抓手,准备抓取物体	
timer 3	%延时3 s	
movel -0.080 0.331 1.350	%移动到目标点 P_2	
hand off	%闭合抓手	
timer 3	%延时3 s	
movel -0.080 0.331 1.450	%移动到点 P_3	
movel 0.486 0.372 1.230	%移动到点 P_4	
movel 0.486 0.372 1.330	%移动到点 P_5	
hand on	%打开抓手,放下物体	
timer 3	%延时3 s	
movel 0.486 0.372 1.230	%移动到点 P_4	
movep -0.030 -0.560 2.060	%移动到点 P_0 ,即复位	
hand off	%闭合抓手	
timer 5	%延时5 s	
END		

图9 机械臂运动指令集

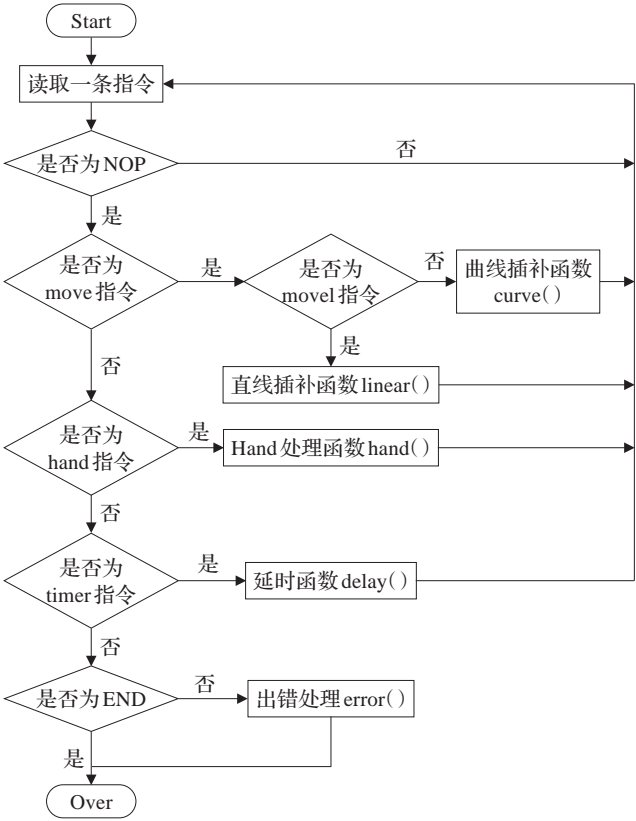


图10 解释执行流程图

6 实验及结果

在Kinect相机扫描地图后获取目标坐标点的位置,通过与生成的xml文件匹配得出目标苹果坐标。采用Matlab进行机械臂运动学仿真得到结果如图11所示,其中图(a)为机械臂末端完整的运动轨迹图,图(b)为机械臂6轴在曲线段($P_0 - P_1$)运动速度图,图(c)为机械臂6轴在曲线段($P_0 - P_1$)运动加速度图。从图11中可以看出,机械臂末端按照要求的轨迹进行运动,且运行平稳。使用生成的代码控制WUST-ARM机械臂,得到如图12所示结果。可以看出机械臂能够准确抓取目标物体,完成指定动作。具体演示视频可通过如下链接观看:
http://v.youku.com/v_show/id_XMTMwNTU0MDg4MA==.html?from=y1.7-1.2&qq-pf-to=pcqq.c2c。

7 结论

本文提出了一种面向模块化智能机械臂的中文自然语言控制系统,其创新之处是在传统的机器人编程基础上引入自然语言和动作指令处理方法。在仿真实验中,将自然语言解析得到的机械臂控制指令能够按照控制要求的轨迹进行作业,验证了该方法的有效性和可行

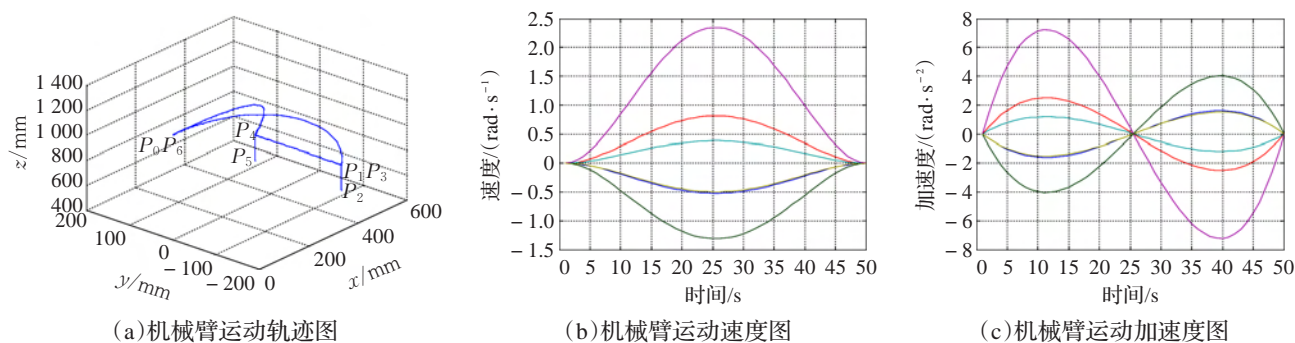


图 11 机械臂运动仿真图



图 12 机械臂实际工作图

性。最后,在实际的工作环境中,机械臂能完成自然语言描述的作业任务。本文研究为实现高智能人机交互提供了基础。

参考文献:

[1] 蔡自兴. 机器人学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[2] 王浩, 谢存禧. 工业机器人解释器的研究[J]. 机械设计与制造, 2010(3): 160-161.

[3] 周泽湘, 丁跃尧, 张敏. 工业机器人解释器的研究与设计[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 154-156.

[4] Choi Y S, Chen T, Jain A, et al. Hand it over or set it down: a user study of object delivery with an assistive mobile manipulator[C]//The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009: 736-743.

[5] Connell J, Marcheret E, Pankanti S, et al. An extensible

language interface for robot manipulation[M]//Artificial general intelligence. Berlin/Heidelberg: Springer, 2012: 21-30.

[6] Matuszek C, Herbst E, Zettlemoyer L, et al. Learning to parse natural language commands to a robot control system[C]//Proc Int'l Symp on Experimental Robotics, 2012: 403-415.

[7] 李新德, 张秀龙, 戴先中. 一种基于受限自然语言处理的移动机器人视觉导航方法[J]. 机器人, 2011, 33(6): 742-749.

[8] 李新德, 张秀龙. 一种面向室内智能机器人导航的路径自然语言处理方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 289-305.

[9] 洪增林. 服务机器人的知识表达和智能推理[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[10] 韩峥, 刘华平, 黄文炳, 等. 基于 Kinect 的机械臂目标抓取[J]. 智能系统学报, 2013(2): 149-155.

[11] 陆志远, 甘亚辉, 戴先中, 等. 基于拟人特性的拟人臂机器人自主抓取动作规划[J]. 机器人, 2014, 36(6): 719-729.

[12] 靳国强, 陈小平. 面向智能服务机器人任务规划的行动语言扩展[J]. 软件学报, 2013(7): 1614-1625.

[13] 刘月华. 实用现代汉语语法[M]. 北京: 外语教学与研究出版社, 1983.

[14] 劳登. 编译原理及实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[15] 张润峰, 刁燕, 陈是扞, 等. 手术机器人高阶多项式插值的轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 161-163.

(上接 75 页)

[11] Mozafari B, Zeng K, Zaniolo C. High-performance complex event processing over XML streams[C]//Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 2012: 253-264.

[12] Neumeyer L, Robbins B, Nair A, et al. S4: distributed stream computing platform[C]//2010 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW), 2010: 170-177.

[13] Apache Storm[EB/OL]. [2012-12-23]. <http://storm.apache.org/>.

[14] Storm A. Storm, distributed and fault-tolerant real-time computation[Z]. 2014.

[15] 王亦雄, 廖湖声, 孔祥翀, 等. CESStream: 一种复杂事件流处理语言[C]//NASAC, 2015.

[16] Peng F, Chawathe S S. Xpath queries on streaming data[C]//SIGMOD, 2003.

[17] 陈皓, 李瑜, 虎嵩林, 等. 基于 S4 框架的并行复杂事件处理系统[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 165-169.

[18] 邵春翡. 分布式复杂事件实时检测及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.