

## 基于 DSL 优化脑瘫康复智能训练系统<sup>①</sup>

卢振利<sup>②\*</sup> 王红<sup>\*\*</sup> 马志鹏<sup>\*\*\*</sup> 沈玄霖<sup>\*\*\*\*</sup> Marko Penčić<sup>\*\*\*\*</sup> 刘燕<sup>\*</sup> 单长考<sup>\*</sup> 赵宇<sup>\*\*\*\*</sup>  
Roumiana Ilieva<sup>\*\*\*\*\*</sup> Tomaz Kosar<sup>\*\*\*\*\*</sup> Marjan Horvat<sup>\*\*\*\*\*</sup> Marjan Memik<sup>\*\*\*\*\*</sup>

(\* 常熟理工学院电气与自动化工程学院 常熟 215500)

(\*\* 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116)

(\*\*\* 常熟市第二人民医院康复医学科 常熟 215500)

(\*\*\*\* 诺维萨德大学技术科学学院 诺维萨德 21000, 塞尔维亚)

(\*\*\*\*\* 常熟理工学院商学院 常熟 215500)

(\*\*\*\*\* 索非亚技术大学管理学院 索非亚 1000, 保加利亚)

(\*\*\*\*\* 马里博尔大学电气工程和计算机科学学院 马里博尔 462000, 斯洛文尼亚)

**摘要** 本文针对脑瘫患儿差异化康复训练方案难于定制的问题,基于领域特定语言(DSL)优化了脑瘫康复系统架构。根据专家给出的脑瘫患儿训练计划,在 Eclipse 平台的 Xtext 构建了控制机械手完成手势动作所需要的领域模型,并且完成了对该领域模型的实现,将其成功用于机械手辅助脑瘫康复动作训练系统中,使得理疗师等非编程技术人员能够为脑瘫患儿康复定制训练方案。

**关键词** 脑瘫; 康复训练; 领域特定语言(DSL); 智能系统

## 0 引言

由于脑瘫患儿的病因和症状以及严重程度都因人而异,所以需要定制脑瘫康复训练方案。如何让理疗师和患儿家长等非编程人员结合临床为每个患儿定制并且实时改变康复训练项目中的内容和时间等参数是当前研究的热门方向<sup>[1-3]</sup>。

通常语音和动作康复训练是由程序员根据前期调研,定制和固化了一些经典的康复训练动作项目,如举手、抬腿和读数字<sup>[4-5]</sup>。将机器人等作为媒介,不仅能够提高趣味性和互动性,更是通过这些智能系统实现数据记录,并进行训练效果评价和分析。脑瘫患儿症状的差异化导致训练中的某些训练项目需要多次重复进行,并且在一段时间的康复训练之

后需要结合患儿的实际情况更改和优化训练计划,这时通常需要程序员通过更改底层代码,重新编辑和生产可执行的工程方案。

针对上述问题,急需一种能够优化该类智能系统架构的新技术,使得非计算机程序员通过简单的界面选择和参数输入直接生成针对不同患儿的康复训练方案,同时保持原来的各项智能系统功能不变。领域特定语言(domain specified language, DSL)<sup>[6-7]</sup>常用来解决使用者与创造者之间自然语言的沟通问题,由此应用 DSL 来优化系统构架。

本文基于上述需求,将 DSL 架构应用于机器人辅助脑瘫康复动作和语音智能系统中,实现了动作名称、动作序列和时间等关键点柔性设置功能。为实现定制脑瘫患儿康复训练方案提供了切实可行的技术手段。

① 中塞第 5 届科技例会交流项目(国科外 2021-04-19)资助。

② 男,1974 年生,博士,副教授;研究方向:机器人智能控制;联系人,E-mail: zhenlilu@cslg.edu.cn (收稿日期:2020-07-16)

## 1 领域专用语言及相关工作

DSL 为了解决系统(包括硬件系统和软件系统)构建初期使用者和构建者的模型不一致导致需求收集困难的问题,就必须让领域专家用双方都能理解的自然语言来解释。在解释的过程中,解决方案的模型构建者就理解了领域知识,双方使用的语言被称为“共同语言”,共同语言是模型构建者用来表达解决方案中的词汇的基础。构建者将这些共同语言对应到模型中,在程序中就是模块名、在数据模型中就是实体名、在测试用例中就是对象。如果能够领域专家通过简单的编程方式描述领域中的所有活动和规则,那么就能在一定程度上保证描述的完整性。

在实际脑瘫康复训练中,康复训练方案的制定因人而异,例如根据患儿的症状选择不同的训练动作、训练周期、训练方法和训练环境等。本文针对数字手势的语音动作训练,结合 DSL 构架,优化了训练系统,使康复师可以自行运用自己熟知的语言格

式来完成特定训练方案程序的编写。

本文中的 DSL 实现是借助 Xtext 工具完成的,代码生成用到的是静态类型编程语言 Xtend<sup>[8]</sup>。Xtext 是 Eclipse 环境下一种基于文本的 DSL 开发工具,是一个实现编程语言的开源框架,使用的是源码编辑。XText 可以快速创建基于文本的领域特定语言(DSL),而且还有语法提亮、错误提示,但是需要注意的是,使用 Xtext 将一个 DSL 文件拆分成多个时,要将项目转换为 Xtext project 才能支持<sup>[9-10]</sup>。

## 2 训练系统架构设计

本文面向脑瘫患儿这一群体,设计了基于 DSL 的脑瘫康复训练系统,实验平台为安装有 LabVIEW 和 Eclipse 的电脑、仿生机械手、Arduino mega 2560<sup>[11]</sup>开发板、LD3320 语音芯片<sup>[12]</sup>、1602LCD 显示屏。系统在 LabVIEW 平台设计上位机控制界面,在 Eclipse 平台上设计 DSL 实现对机械手的控制,系统架构如图 1 所示。

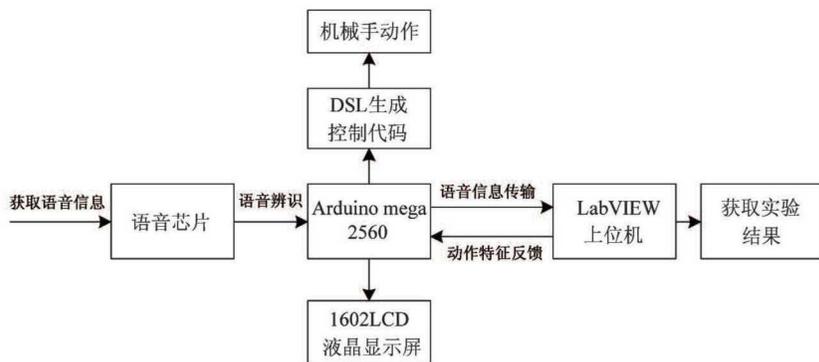


图 1 系统架构

系统主要包含下位机系统的语音识别模块、语音显示模块、机械手控制模块,以及上位机系统的显示界面这 4 个组成部分。

图 2 所示为系统流程图。系统首先通过播放语音和显示界面图片引导患儿跟读语音并且做出手势动作,语音模块采集患儿的语音进行识别,在液晶显示屏上显示识别到的数字拼音,识别的数据传给上位机,上位机对接收到的内容进行对比,记录患儿完成识别的正确率、不合格次数和识别时间,同时对机

械手的手势进行分析定义,使得机械手做出相应的手势动作,以帮助患儿对数字动作的理解。

### 2.1 基于 DSL 优化的语音控制系统

#### 2.1.1 语音识别模块

语音识别采用 LD3320 语音模块采集患儿的语音,同内部构建的识别码进行匹配,匹配到的内容经过串口发送给控制芯片和上位机界面,用于下一步对机械手的控制。表 1 为语音模块匹配表。

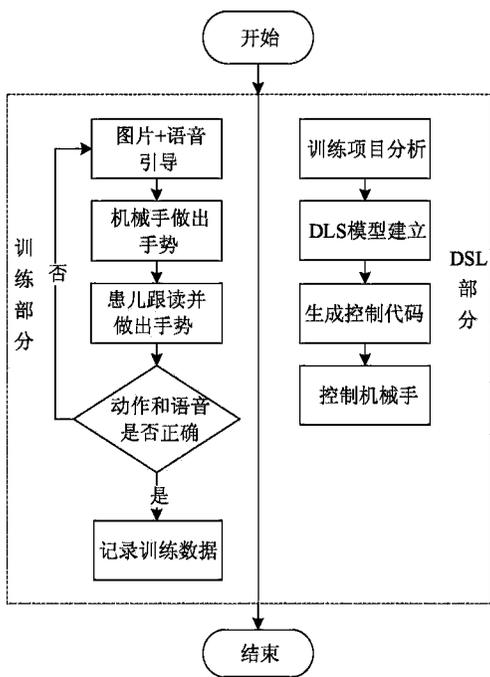


图2 系统流程图

表1 语音模块匹配表

语音	识别码	串口返回值
yi	CODE_Yi	%1\n
er	CODE_Er	%2\n
san	CODE_San	%3\n
si	CODE_Si	%4\n
wu	CODE_Wu	%5\n

2.1.2 语音显示模块

语音显示模块用来显示患儿通过麦克风反馈的语音信息,采用的是 1602LCD 显示屏,如图 3 所示。



图3 1602LCD 液晶显示屏

本文中设置其显示的内容为患儿所读内容的拼音,如表 2 所示为串口返回值对应的显示内容。

2.1.3 机械手控制模块

仿生机械手是一种能够做出多种与人类手运动

表2 显示内容对照表

串口返回值	显示内容
%1\n	Yi
%2\n	Er
%3\n	San
%4\n	Si
%5\n	Wu

特征相同手势动作的机器人系统,它主要通过内部的控制芯片来实现控制目的,如图 4 所示为仿生机机械手实物图。

在进行流程设计时,需要先对做出的手势动作进行分析与定义,定义初始状态。例如竖起大拇指动作即表示为大拇指弯曲转动 160°,其他手指状态保持不变。按照理论可将最大弯曲角度定义为 180°,但为了确保仿生机机械手内部安装的舵机不会产生较大磨损,必须将极限角度参数控制在 10°~160°之间。



图4 仿生机机械手

手势定义完成后,通过串口通信接收到执行模块传送的指令,不同关节依据不同手势进行相应的参数设置,做出对应的手势动作,并完成目标动作。

2.2 基于 DSL 优化训练系统的交互界面设置

上位机界面模块选择 LabVIEW 设计交互界面,在测试过程中辅助判断测试者对数字手势的辨别情况、反应能力以及语言能力。当开始测试时,在小窗口上显示手势图片,测试者辨别手势图片所表示的数字,读出数字拼音,如果识别正确,绿色指示灯亮,更换图片,否则一直停留在这一状态。在测试过程

中,实时记录辨别时间和正确率,绘制辨别时间曲线。如图5为上位机界面。



图5 上位机界面

### 2.2.1 数字手势图片显示

在上位机中为了实现自动显示并更新数字手势图片,设计一个可以根据不同输入字符随机显示图片的子VI。通过拆分路径和创建路径形成数字手势图片的路径,再通过读取JPEG文件返回图像信息,经过绘制平像化像素图在小窗口显示数字手势图片,图6为图片显示程序图。

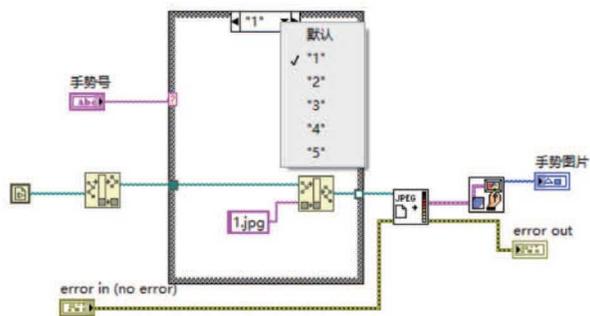


图6 图片显示程序图

### 2.2.2 串口通信

为保证上位机与主控模块对应的串口能够在通信方面达成一致,需要采用VISA仪器中集成的标准输入/输出接口,波特率设置为9600 bps。VISA对串口的控制精度较高,能够通过USB接口与其他设备对接,进而使其具备了控制功能拓展能力。此外,在使用的仪表类型较为特殊的情况下,还可以通过对驱动程序的调试和安装,为其提供具有针对性的环境。图7为读取串口数据图。

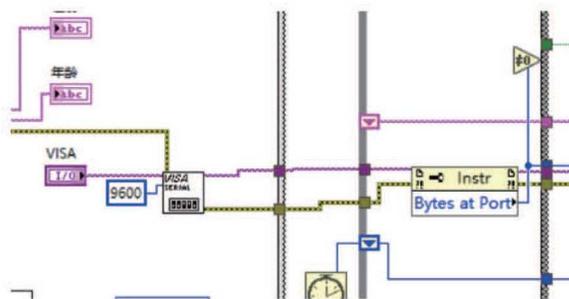


图7 读取串口数据图

## 3 基于DSL的训练方案实现

将领域特定语言应用于脑瘫康复训练系统,主要体现在仿生机械手部分,包括构建领域模型和生成控制代码。在领域特定语言中,对领域特定语言的定义包含4个关键元素<sup>[13-14]</sup>。

(1) 计算机程序设计语言,使用DSL像大多数程序设计语言一样设计特定的语言指挥计算机按照计划做一些事情,这种特定的语言结构简单且更容易理解。

(2) 语言性,DSL是一种具备连贯表达能力的程序设计语言,可以是单个或者多个表达式组合在一起形成的结构性语言。

(3) 受限的表达性,DSL虽然能够弥补其他程序设计复杂难学和难以使用的缺点,但是其只支持在特定领域使用,不能构建一个完整的系统,只能解决某一方面的问题,无法像其他程序设计语言拥有各种类型的数据和结构。

(4) 针对领域,DSL只适合使用在某一特定明确的领域。

所以在机械手控制中使用领域特定语言能够更加清晰地表明对不同手势动作的控制,针对不同的脑瘫康复训练计划进行建模,在建模的过程中规定使用DSL设计的模型应该能够使复杂的问题简单化,不出现语法歧义等原则,便于非程序人员对系统的理解和使用。

### 3.1 领域模型描述与建立

DSL模型语言的建立在Eclipse平台下的Xtext工程上完成,模型中有如下规定。

第1行表示机器人种类 hand bionic。

第2行设置机器人动作的速度 speed,分为3种

类型 slow、medium 及 fast,与 speed 之间以空格隔开。此处动作速度设置应用于控制代码中循环运行的程序内。

第 3 行表示动作循环的次数 repeat,具体循环的次数填在 repeat 后面,以空格相隔,未加次数表示无限循环。

从第 4 行开始,进入动作循环过程,begin 为开始标志,end 为结束标志,循环动作可以为数字手势,也可以是其他特征手势,如握拳、厉害、支持等。

要建立上述的 DSL 模型需要先对每个变量进行定义,有 RobotType、SpeedStmt、SpeedOption、OpenObj 和 CloseObj 等,具体描述如表 3 所示。

表 3 变量描述表

变量名	描述
Model	定义 Define、Calibration、Repetition 3 个模块
Define	定义第 1 行 RobotType 机器人类型
Calibration	定义初始化 InitStmt
InitStmt	定义关于初始状态和动作速度的设置
SpecStmt	定义初始状态,包括 OpenObj 和 CloseObj
OpenObj	定义打开:“open” MoveObj
CloseObj	定义闭合:“close” MoveObj
MoveObj	定义动作对象,是单个手指还是整个手掌
SpeedStmt	定义动作速度,包括 slow、medium 和 fast
Repetition	定义循环从 repeat、begin 到 end 结束

### 3.2 生成控制代码

生成控制代码可以将建立的 DSL 模型语言转换成可以被机械手模块识别的控制代码,简化操作过程。生成代码的具体操作在 Eclipse 平台上面的 Xtend 上完成。打开 org.xtext.example.mydsl.ide 中的 Xtend 文件,在这里完成程序的编写。

首先是建立全局变量,分别对应机械手上 5 个手指的舵机,变量名分别为 thumbservo、indexservo、middleservo、ringservo 和 littleservo。

根据模型需要将程序分为以下 3 类。

(1) RobotArmInclude(),设置 arduino 程序中对应的变量名,如拇指设定为 Servo thumbservo。

(2) RobotArmSetup(),设置舵机端口号以及手的初始动作,拇指到小指 5 个手指的舵机端口号分别为 5、6、9、10、11,初始动作设置为握拳。

(3) RobotArmLoop(),对应 Arduino 程序 loop() 函数下的内容,设置不同手势下的舵机运转角度,根据前面设定的串口值,当接收到不同指令时运行相应的动作。

完成程序设置后需要将其以 Arduino 控制程序的文件格式输出,使用 IGenerate.output() 函数可以将文件以 rehab1.ino 格式输出,应用于机械手的动作控制。

## 4 基于 DSL 优化的系统测试

### 4.1 语音识别测试

康复训练系统需要对非特定人进行训练,为了达到测试效果,共选取了 10 位受测者,每位受测者进行 10 组语音识别,分别对每个识别指令进行测试和结果统计。

调用串口调试助手测试识别率,与语音识别模块相连,波特率为 9600 bps,8 位数据位,没有奇偶校验位,1 位停止位,同时以文本形式对数据进行接收。模块上电初始化后,进入识别状态,等待语音信号的输入。

对 10 位受测者分别进行 10 组数字 1~5 的语音指令识别,对每条指令的识别率进行统计,判断该系统的识别精度。如表 4 所示为识别结果统计。

表 4 显示内容对照表

语音指令	识别率
yi	94%
er	98%
san	96%
si	93%
wu	96%

### 4.2 系统测试

当主控模块、语音识别模块、显示模块和仿生机器人系统相互连接并上电后,语音芯片 LED 灯亮,表明语音模块与主控制器处于正常连接状态,可随时进行语音识别。此时对语音芯片说出语音指令“yi”,显示屏正确显示相应的拼音“Yi”,即表明语音芯片测试正常,如图 8(a)所示;与此同时,仿生机

械手同步动作手势“1”如图8(b)所示,即说明仿生机械手模块与主控制器连接正常以及测试运行正常。

延续上述过程结合上位机界面模块继续进行测试,此时上位机界面显示数字“2”的手势图片,对着语音芯片说出语音指令“er”,显示屏正确显示相应的拼音“Er”,如图9(a)所示;界面右边绿灯亮起,如图9(b)所示;仿生机械手同步数字手势“2”,如图9(c)所示,整个系统测试完好。

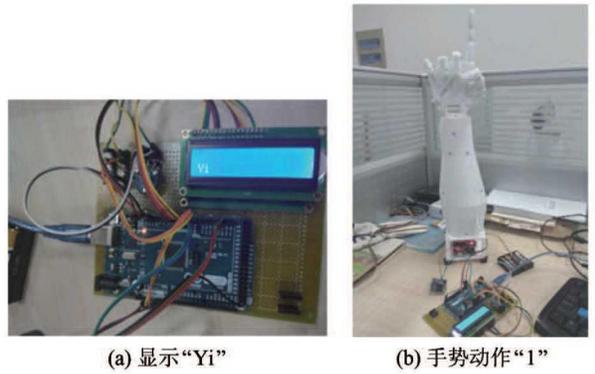


图8 硬件系统测试



图9 上位机界面测试

## 5 基于 DSL 的系统性能分析

下面通过脑瘫康复训练的具体案例对系统性能进行测试分析。以5个数字识别指令为一组,每个语音指令的识别时间最长为15s,超过时限记为识别错误,记录完成一组的识别时间和识别率,每次测试5组,取平均识别时间和总识别率作为此次测试的识别效果对比数据,一共测试10次,每天测试一次,训练周期为10d<sup>[15-18]</sup>。如图10所示为语音康复训练场景。

以下是从多名受测者中选取的3位具有代表性的受测者的训练结果。受测者A,肢体运动与语言交流能力基本正常,注意力集中时间较长;受测者B,存在肢体运动障碍,语言交流能力较强,注意力集中时间较长;受测者C,肢体运动障碍较严重,语言交流能力较差,注意力集中时间较短。图11为3位受测者10次测试的平均识别时间变化,图12为10次测试的识别率变化。



图10 语音康复训练场景

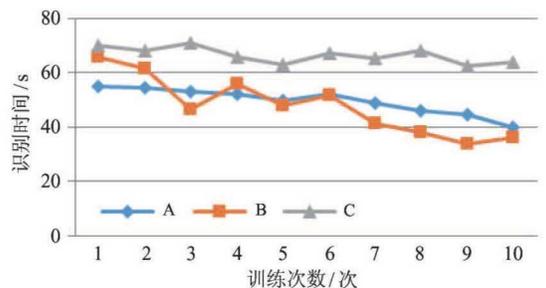


图11 10次测试的平均识别时间

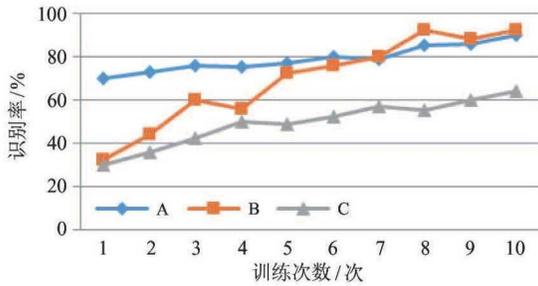


图 12 10 次测试的识别率变化

图 11 表示了训练周期内 3 位受测者完成一组训练平均识别时间的变化,可以看出受测者 B 的训练时间呈现出明显的下降趋势,受测者 A 较其他两位用时最少,受测者 C 用时最多,整体上 3 位受测者的用时均有减少。图 12 为 3 位受测者完成一组训练的识别率,3 位受测者比较,受测者 A 的识别率均比较高,而受测者 C 的识别率均比较低,受测者 B 的识别率呈现持续的大幅上升,总体识别率呈现上升趋势。因此,在脑瘫康复训练过程中,多次应用本系统进行重复训练,能体现一定的效果。

## 6 结论

本文设计了基于 DSL 的脑瘫康复训练系统,主要用于帮助因脑瘫疾病导致的肢体障碍和语言障碍的孩子通过训练恢复其基本的肢体和语言功能,提高生活质量。首先针对训练项目,建立 DSL 模型,再将 DSL 与训练系统结合,控制单片机,达到获取并显示语音信息以及使机械手按照规定完成动作的目的。让非编程人员能够结合临床,根据患儿的训练情况,实时改变康复训练项目中的内容和时间等,提高训练效果。实验结果表明,该系统对肢体和语言障碍的脑瘫患儿有一定的辅助康复作用,也对临床脑瘫患儿的治疗提供了技术支持。

### 参考文献

[ 1 ] 丁海国. 脑瘫孩子病因分析及康复训练降低肌张力初探[J]. 教育革新, 2020(8):63

[ 2 ] 翟爽, 刘思远. 小儿脑瘫康复治疗研究进展[J]. 临床军医杂志, 2019,47(11):1273-1275

[ 3 ] 陶维娜, 苏红娜. 浅谈小儿脑性瘫痪[J]. 中国医药指

南, 2013,11(33):579-580

[ 4 ] 林庆. 小儿脑瘫的定义诊断条件及分型[J]. 中华儿科杂志,1989,3(27):162-163

[ 5 ] Kos T, Kosar T, Knez J, et al. From DCOM interfaces to domain-specific modeling language: a case study on the Sequencer[J]. *Computer Science and Information Systems*, 2011,8(2):361-378

[ 6 ] Carrero M A, Musicante M A, Santos A L, et al. A DSL for WSN software components coordination[J]. *Information Systems*, 2019, 98(6): 101461

[ 7 ] 郑蕊. 基于 DSL 的电化学仪器上位机软件产品线的设计与实现[D]. 长春:东北师范大学计算机科学与技术学院, 2014

[ 8 ] Boronat A. Expressive and efficient model transformation with an Internal DSL of Xtend[C] // *Proceedings of the 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, NewYork, USA, 2018:78-88

[ 9 ] 姜靖, 郑启龙. 面向计算机视觉的领域特定语言[J]. 小型微型计算机系统, 2020,41(3):617-624

[ 10 ] 王巍. 基于 DSL 的一种数据合法性校验框架的设计与实现[D]. 长春:东北师范大学信息科学与技术学院, 2018

[ 11 ] 刘一主编. 基于 STM32 的嵌入式系统设计[M]. 北京:中国铁道出版社,2015:9

[ 12 ] 王玲玲, 符开茂. 基于 STM32 的智能音响控制系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2019,31(21):116-118

[ 13 ] 卢振利, 马志鹏, 波罗瓦茨·布朗尼斯拉夫, 等. 基于镜像神经系统机制的语音动作康复训练系统设计[J]. 高技术通讯, 2019, 29(5):503-511

[ 14 ] Bettini L. Implementing Domain-Specific Languages with Xtext and Xtend[M]. Birmingham: Packt Publishing, 2013

[ 15 ] Fowler M. Domain-Specific Languages[M]. New Jersey: Pearson Education, 2010: 25-37

[ 16 ] 王秋根, 张秋林主编. 脑瘫[M]. 上海:第二军医大学出版社,2001:6

[ 17 ] 陈旭红著. 图解脑瘫康复技术与管理[M]. 北京:华夏出版社,2007:8

[ 18 ] 侯梅, 赵荣安, 李玉堂, 等. 脑瘫患儿构音障碍特点与言语治疗[J]. 中国康复,1999(2):86-87

## DSL-based optimization of intelligent rehabilitation system for cerebral palsy

Lu Zhenli<sup>\*</sup>, Wang Hong<sup>\*\*</sup>, Ma Zhipeng<sup>\*\*\*</sup>, Shen Xuanlin<sup>\*\*\*\*</sup>, Marko Penčić<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Liu Yan<sup>\*</sup>,  
Shan Changkao<sup>\*</sup>, Zhao Yu<sup>\*\*\*\*</sup>, Roumiana Ilieva<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Tomaz Kosar<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Marjan Horvat<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Marjan Mernik<sup>\*\*\*\*\*</sup>

(<sup>\*</sup> School of Electrical Engineering and Automation, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(<sup>\*\*</sup> School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

(<sup>\*\*\*</sup> Department of Rehabilitation Medicine, Changshu No.2 People Hospital, Changshu 215500)

(<sup>\*\*\*\*</sup> Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad 21000, Serbia)

(<sup>\*\*\*\*\*</sup> School of Business, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500)

(<sup>\*\*\*\*\*</sup> Faculty of Management, Technical University of Sofia, Sofia 1000, Bulgaria)

(<sup>\*\*\*\*\*</sup> Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Maribor, Maribor 462000, Slovenia)

### Abstract

Aiming at the problem that the differentiated rehabilitation training program for children with cerebral palsy is difficult to customize, the architecture of the cerebral palsy rehabilitation system is optimized based on the domain specific language (DSL). According to the training plan for children with cerebral palsy given by experts, the domain model required to control the robot to complete the gestures is built on Xtext on the Eclipse platform, and the realization of the domain model is completed, which is successfully used in the robot-assisted cerebral palsy rehabilitation. This training system enables non-programming technicians such as physical therapists to customize training programs for the rehabilitation of children with cerebral palsy.

**Key words:** cerebral palsy, rehabilitation, domain specific language (DSL), intelligent system