

◆ 实验实训与实践教学

文章编号：1672-5913(2012)18-0105-05

中图分类号：G642

模糊控制课程实验体系设计与实现

王丽娜, 潘伟

(厦门大学 智能科学与技术系 福建省仿脑智能系统重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要：分析模糊控制课程实验教学过程中存在的问题，提出一个从仿真软件到实体机器人上进行模糊控制实验的实验体系。该体系由三个由易到难并逐步深入的环节组成：1) 采用 Matlab 模糊工具箱设计模糊控制器；2) 在 Webots 仿真软件环境下，实现编程语言环境下的模糊控制仿真实验；3) 实现在实体机器人上的模糊伺服控制系统。

关键词：模糊控制；仿真平台；Matlab；Webots

智能控制作为一门新兴的边缘交叉学科，涵盖人工智能与专家控制、模糊数学与模糊控制、人工神经网络与神经网络控制以及免疫和遗传算法等前沿学科理论^[1]。模糊控制作为智能控制的一个重要分支，体现人类解决实际问题的智慧，与其它精确数学模型控制方法相比，在处理不精确与启发式知识和控制具有高度不确定性的复杂系统时，具有明显优越性。

模糊控制广泛应用于各种各样的控制系统中，并在其中发挥独特的优势。目前，国内众多高校已经将模糊控制课程列入到智能相关专业本科生的教学计划中，其目的是培养具有较强工程实践能力、创新能力、发展能力和竞争能力的应用型技术人才。

本文分析模糊控制课程实验教学过程中存在的问题，提出一个从仿真软件到实体机器人、循序渐进、分三个环节进行的模糊控制的实验体系：采用 Matlab，实现模糊控制器的设计与仿真；利用 Webots 仿真软件，实现编程语言环境下的 NAO 机器人踢球仿真实验；演示基于模糊控制原理的 NAO 机器人伺服抓取实验。本文提

出的模糊控制实验体系能极大提高学生学习兴趣和实践能力，帮助学生深刻地理解模糊控制理论，掌握模糊控制实现技术。通过一届学生的教学实践活动，已取得很好的教学成果。

1 课程特点及要求

1.1 模糊控制实验教学现状

模糊控制是一种基于规则的控制，直接采用语言型控制规则，对被控对象不需要建立精确的数学模型，只需要提供相关专家的经验知识；模糊控制采用不精确推理，其推理过程以人类经验为基础，模仿人类思维过程，来解决数学模型难以获取的系统控制问题^[2]。

目前，在本科教学过程中，由于实验条件等方面的原因，模糊控制实验内容大多在仿真环境下进行。常用的仿真软件如 Matlab、LabView 都具有高度集成化的操作界面，学生只需调用相应的模糊工具箱，调节其中的参数，按部就班地完成实验步骤，就可以完成同一个实验，得出同一个结论。这样的实验可以方便地使学生加深

基金项目：国家自然科学基金(60975084)。

作者简介：王丽娜，女，硕士，研究方向为智能机器人行为学习；潘伟，男，教授，研究方向为智能机器人。

对模糊控制各模块的认识和体验模糊控制的特点与优点。但在实际的系统中，模糊控制是无法直接利用仿真软件的模糊控制工具箱来实现的，而需要利用编程方式，在实际的系统中实现模块控制。这样就造成模糊控制课程的学习、实验与生产应用的严重脱节。

1.2 实践教学改革

根据模糊控制课程的培养目标和以往的实践教学模式基础，我们提出一个从仿真软件到实体机器人上进行模糊控制演示实验的实验体系。学生可以通过实践设计加深对理论的理解，验证所学理论的正确性，并运用所学理论知识进行基本技能训练，进而培养操作能力、创新能力和解决问题的能力。

1) 从简单的 Matlab 仿真平台入手，让学生熟悉 Matlab 在模糊控制中的仿真与应用，引导学生用 Matlab 中的 Simulink 与 Fuzzy-Tool 工具箱构造模糊控制系统框图和控制器进行仿真实验，来实现设计的最终要求，使学生体会到模糊控制的优越控制效果。

2) 运用 Simulink 仿真，可以省去学生对模糊控制器设计的完整独立编程，降低实验难度，但无法以让学生深刻地理解模糊控制设计方法的精髓，我们接下来以 Webots 作为课程实验仿真平台。通过 Webots 仿真平台，学生可以自行编写模糊控制算法程序，更深入地了解模糊控制算法如何实现，实现仿真条件下基于模糊控制的 NAO 机器人点球竞技比赛，提高实验技能和灵活运用理论知识分析、解决问题的能力。

3) 基于 Webots 仿真平台的课程实验设计，具有很多传统教学无法比拟的优势，但是，仿真实验的环境和条件是人为预先设置好的，与现实环境有很大不同。因此，将 Webots 仿真环境下调好的程序移植到机器人实体上是十分必要的，本实验体系要求学生完成 NAO 实体机器人的伺服实验。这样从简单到复杂、局部到整体、仿真到实体机器人，学生能够逐步掌握模糊控制系统

的设计方法，加深对模糊控制理论的了解，并且保持对该课程的浓厚兴趣。通过一届学生的教学实践，证明采用此实验教学方法，确实能大大提高课堂讲授效果。

2 模糊控制实验体系

2.1 基于 Matlab 的模糊控制仿真系统设计

Matlab 仿真的目的是使学生对模糊控制的基本理论和概念有一定的理解，实验本身难度不大，是模糊控制教学实验的基础性实验。本体系以一个模糊控制算法研究为例作为第一个课程实验，学生在掌握如何在仿真软件中进行模糊控制设计后，进而可以进行基于 Matlab 平台的倒立摆系统、车球系统和水箱液位的模糊控制实验。模糊控制算法实验的基本要求、实验内容和实验效果如下。

1) 基本要求：通过本次实验设计，了解模糊控制的基本原理、模糊模型的建立和模糊控制器的设计过程；熟悉模糊规则表的建立、论域的选择及隶属度函数的选取；提高相关控制系统的程序设计能力；熟悉 Matlab 语言以及在模糊控制设计中的应用。

2) 实验内容。

(1) 用 Matlab 中的 SIMULINK 工具箱，组成一个模糊控制系统，采用模糊控制算法，设计出能跟踪给定输入的模糊控制器，对被控对象进行仿真，绘制出系统的阶跃响应曲线；

(2) 改变模糊控制器中模糊变量的隶属度函数，分析隶属度函数和模糊控制规则对模糊控制效果的影响，比较在哪种情况下的控制效果较好；

(3) 改变系统的参数，了解模糊控制在系统参数发生变化时的控制效果，并与 PID 控制作用下系统参数发生变化时的控制效果进行比较，体会模糊控制相对于传统控制的优点。

3) 实验效果：学生通过本次实验可知，采用模糊控制能够得到良好的动态响应性能，并且不需要知道被控对象的数学模型，鲁棒性好。试

验中,当学生改变增益值 Gain 时,系统的超调量和调整时间及稳态误差随之改变,即增大 Gain 增益,可以增大系统的超调量,减小静态误差,但是却减弱了系统的稳定性^[3]。

通过此类实验,学生对模糊控制的基本理论和概念有了一定的理解,但此实验运用 Simulink 工具箱进行仿真,省去学生对模糊控制器设计的完整独立编程,并且封装后的图形化界面并不能让学生进行编程修改,在一定程度上限制学生的创新性。因此,在此基础上,我们探索运用 Webots 仿真平台进行课程实验设计,让学生独立完成整个模糊控制算法的编程。

2.2 基于 Webots 的实验设计

Webots 主要由世界文件、控制程序和相应物理插件这三个部分组成^[4]。Webots 仿真软件在模糊控制课程教学中发挥其独特的优势。

1) 直观性强。Webots 仿真条件下的互动教学使得教师既可以用多媒体演示教学实验内容,又可以观察学生的现场操作,实时了解教学情况,使得实践课堂变得更加具体和生动。

2) 激发学生的学习兴趣,提高教学效果。传统的实验教学模式主要是课堂教学,并不注重动手实践,学生自己编写的程序正确与否是通过教师批改来知晓的,教师需要对程序进行逐个检查,内容繁杂且工作量大。现在,学生可以直接在 Webots 仿真系统下模拟真实场景并编写控制代码。仿真条件下的机器人控制过程和实际运动情况十分相似,通过在仿真环境下的操作,学生将会体验到真实的实验场景。

我们要求学生在 Webots 环境下,利用模糊控制系统的设计要求,进行 NAO 机器人踢球仿真程序的编写。其中,NAO 机器人是法国 Aldenaran Robotics 机器人公司开发的机器人,该机器人有出色的外观以及灵活的运动系统,同时具有视觉和听觉,可以与人直接进行交流。厦门大学在 2008 年就引进 NAO 机器人作为机器人研究平台,迄今为止,已经获得多项研究成果。机

器人踢球仿真实验的基本要求、实验内容和设计、仿真实验效果与分析具体如下。

1) 基本要求:根据模糊控制理论,设计出系统的模糊控制器及其模糊控制算法,并根据此模糊控制算法,检验该控制器的合理性和有效性;了解 Webots 仿真平台的使用方法;运用 C++、java 或 MATLAB 语言,提高学生的程序设计能力。

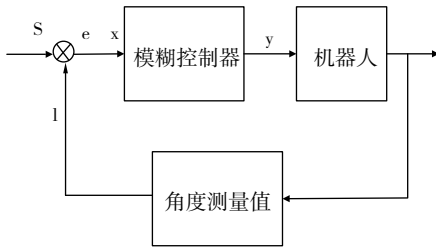
2) 实验内容:我们以模糊控制理论为基础,实现仿真条件下 NAO 机器人踢球实验的分析与设计,其中 NAO 机器人模糊控制系统框图如图 1(a) 所示。

其中, s 为机器人脚的结构误差, e 为偏差,由于仿真环境下的实验相对比较精确,所以可以忽略机器人脚的结构误差; x 和 y 分别为模糊控制器的输入和输出,即 x 代表机器人与球角度和机器人与球门角度的加权和, y 代表机器人转动角度控制量。仿真空间俯视示意图如图 1(b) 所示,通过模糊控制器对精确的角度输入值进行处理,即对其进行模糊化、根据规则库选择激活规则、解模糊,最终得到机器人身体旋转的精确度数,进而实现机器人踢球运动。

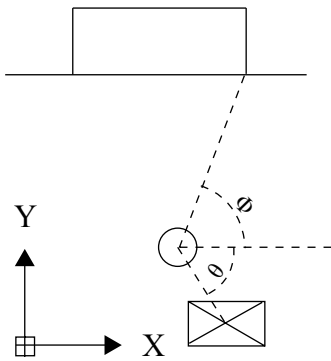
3) 实验设计:首先,通过 `getBallDirection()`、`getBallDistance()` 得到机器人与足球间的距离与角度,NAO 通过 `.motions` 文件的选择,移动至足球前方;然后,利用模糊控制原理进行踢球角度的选择,其中模糊控制器的设计思想如下所述。

选择机器人与球的角度 `ballDir` 和机器人与球门的角度 `goalDir` 作为输入的基数,定义 `inPut=ballDir+0.05*goalDi`,由于本次实验重在实现踢球,所以机器人与球间的角度所占权值较大,在仿真调试时可根据具体要求灵活调节相应权值。将机器人转动角度的控制量量化为五个等级,分别为负大(NB)、负小(NS)、零(0)、正小(PS)、正大(PB),其隶属度函数如图 1(c) 所示。模糊控制规则用 IF A THEN B 的形式表示,例如,IF `inPut=POSSITIVE_60` THEN `DIR=TURN_POSSITIVE_60`。根据对 NAO 机器

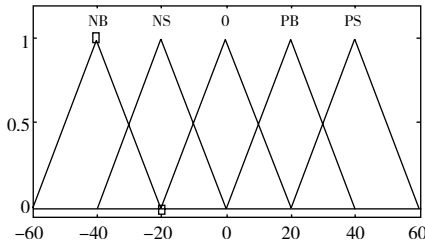
人踢球的仿真实验操作研究，其模糊控制规则表如表 1 所示。



(a) Nao 机器人模糊控制系统框图



(b) 仿真空间俯视示意图



(c) 输入隶属度函数

图 1 机器人踢球仿真实验系统

表 1 模糊控制规则表

X	NB	NS	0	PS	PB
Y	PB	PS	0	NS	NB

将所有规则的条件和控制器输入进行比较，确定当前状态应该应用的规则，并由目前状态下采用的规则决定结论。最后，将模糊推理得到的蕴含模糊集合合并，得到“最确定的控制”输出，最后进行去模糊运算，本文中采用重心法。模糊控制算法代码如下：

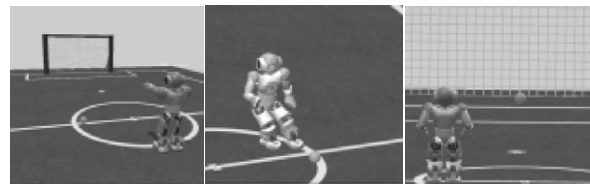
```

Float fuzzy(float x)
{
    ...
    void rActivate(float x);          /* 输入 x
    所激活的规则 */
    int interval(float x);           /* 输入 x
    所激活的规则所在的区间 */
    float mInput(int r,int j,float x); /* 第 r 条
    规则，第 j 个区间下的输入隶属度函数 */
    float mOutput(int r,int j,float x); /* 第 r 条
    规则，第 j 个区间下的输出隶属度函数 */
    float yOutput(int r,int j,float h); /* 第 r 条
    规则，第 j 个区间，隶属度函数值 h 下的输出 */
}

```

4) 仿真实验效果分析

NAO 机器人射门仿真实验结果如图 2 所示。在实验过程中，引导学生在 Webots 仿真系统下创建 controllers、worlds 和 protos，在仿真世界环境中加入环境要素，使学生充分体会到真实场景的再现，进而产生浓厚的学习兴趣；通过模糊控制理论的学习，学生可以自行完成模糊控制器的设计，编写 NAO 机器人 controller 控制代码，在 Webots 下实现对 NAO 机器人射门行为的控制。通过此仿真实验，有效地激发学生对该课程的兴趣，增进对模糊控制本质特性和应用特点的理解，由此可见该仿真实验取得很好的效果。



(a) 初始 NAO 机器人 (b) NAO 机器人 (c) 射门成功
向球方向移动 射门

图 2 NAO 机器人射门仿真实验演示

2.3 实体机器人模糊控制实验

仿真实验教学是不能完全替代实体实验的，为充分体现本课程的特点，在接下来的教学工作中，我们将会把 Webots 仿真环境下调好的

程序移植到 NAO 机器人实体上,进行模糊伺服控制实验。NAO 机器人踢球伺服实验的设计是:首先,通过 ALProxy 与 callVoid 实现计算机与 NAO 机器人的无线连接;其次,将 Webots 仿真环境下的模糊控制模块移植到 NaoRobot 项目中,其中,Webots 仿真平台下的接口函数与 NAO 机器人略有不同,所以要查阅 NAO 机器人 API 来实现其相应功能,另外,Webots 仿真环境下的机器人视觉识别球体的功能函数在此无法调用,因此,我们应用 OpenCV 函数实现相同功能;最后,通过通信模块、视觉识别、控制模块来实现 NAO 机器人踢球的伺服控制系统。相信通过运用 NAO 机器人平台,可以使学生更好地在实际中观察 NAO 机器人在模糊规则下的动作行为,并与仿真环境相类比,发现和解决出现的各种问题。

虽然本课程实验改革的第一年没有实现让学生在 NAO 机器人实体上运行,但在课程的最后,我们向学生展示基于模糊控制的 NAO 机器人视觉伺服抓取,向学生讲解如何在实体机器人上实现基于模糊控制的伺服控制,使学生体会到模糊控制的优越性,达到理论与实践相结合的目的。NAO 机器人抓取实验过程如图 3 所示。

参考文献:

- [1] 师黎,陈铁军,李晓媛.等.智能控制理论及应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [2] 陈杰,薛彬.模糊控制的研究现状与展望[J].自动化仪表,2006(6):1-2.
- [3] 师黎,陈铁军,李晓媛,等.智能控制实验与综合设计指导[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [4] Yvan Bourquin, Fabien Rohrer. Documentation: Webots User Guide[EB/OL]. [2012-04-02]. <http://www.cyberbotics.com>.



(a) 机器人抓取的初始状态 (b) 手臂向铅笔所在位置移动 (c) 机器人的手抓住铅笔

图 3 NAO 机器人抓取过程

3 结语

课程前期实现基于 Matlab 与 Webots 平台的仿真实验,虽然这两个模糊仿真实验方案实现方式不同,但均有良好的教学效果,促进学生对模糊控制算法核心思想的理解,提高运用其进行模糊控制系统分析和设计的信心。通过在课程中带领学生设计基于实体机器人的模糊控制实验,加深学生对模糊控制理论的理解,学会运用所学模糊控制理论知识进行课程设计,培养学生的操作、创新和解决问题的能力,同时,此环节也为下一届本科生教学奠定实践基础。最后,基于 NAO 机器人伺服抓取实验的演示体现模糊控制在伺服系统控制中的优越性,激发学生的学习兴趣,有效地提高教学质量,突出教学的初衷。实际教学表明,这种从仿真软件到实体机器人上进行模糊控制演示实验的实验体系具有很好的教学效果。

(编辑:宋文婷)