

本科论文

(工学学士学位论文)

培 养 单 位 : 计算机科学与技术系

研 究 生 : 马 张 弛

指 导 教 师 : 导师姓名

二〇二四年五月

摘 要

决策系统在机器人等自动系统占据非常重要的位置。它将从其他输入设备中得到的各类输入进行量化, 经过推理或计算, 从而决定或改变机器人的下一步行为。模糊推理是不确定推理的一种。在人工智能技术开发中有重大意义。用于模糊推理的 Petri 网 (FRPNs) 是 Petri 网的重要分支, 适用于知识表示和人工智能。本课题简单论述了智能机器人与决策系统的发展现状和 Petri 网的一些特性, 分析并实现了 FRPN 的典型算法。然后将其在智能家居中进行了应用。本课题结合实际情况分析了家具设备推理系统需要考虑到的各类因素, 并进行了整理和量化。在此之上运行算法, 得到合理的推理结果。本课题利用了 Petri 网图形化的优势和矩阵运算的数学优势, 得到的结果与实际情况基本一致, 可以作为打扫规划的一种参考。

关键词: 模糊推理 Petri 网; 智能决策; 扫地机器人; 人工智能

Abstract

Decision system plays a very important role in robot and other automatic systems. It quantifies all kinds of input from other input devices, and feedbacks and influences the robot's next behavior after reasoning or calculation. Fuzzy reasoning is a kind of uncertain reasoning. It has great significance in the development of artificial intelligence technology. The Petri net (FRPNs) for fuzzy reasoning is an important branch of Petri net, which is suitable for knowledge representation and artificial intelligence. In this paper, the development of intelligent robot and decision system and some characteristics of Petri net are discussed, and the typical algorithm of FRPNs is analyzed and implemented. Then we applied FRPNs system in smart home. This paper analyzes all kinds of factors that need to be considered in the reasoning system of furniture equipment based on the actual situation, and arranges and quantifies them. On this basis, the algorithm is run to get reasonable reasoning results. In this paper, the advantages of Petri net and matrix operation are used. The results are consistent with the actual situation, which can be used as a reference for cleaning planning.

Keywords: FRPNs; intelligent decision; Robot Vacuum cleaner; AI

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	III
插图清单.....	V
附表清单.....	VI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 智能机器人与决策系统	1
1.1.2 Petri 网和模糊推理 Petri 网	1
1.2 相关技术的现状	2
1.3 总体技术方案及其社会影响	3
1.4 技术方案的经济因素分析	3
1.5 论文章节安排	3
第 2 章 智能机器人的决策与模糊决策	4
2.1 智能机器人的决策系统	4
2.2 模糊方法与决策	4
第 3 章 Petri 网的基本原理与方法	6
3.1 Petri 网基本知识.....	6
3.2 FRPN 网基本知识.....	7
3.3 FRPN 的公式推导与理论说明	8
3.3.1 FRPNs 元素	8
3.3.2 推理规则.....	8
3.3.3 复杂度分析.....	10
3.4 FRPN 的实现步骤与流程图.....	11
3.4.1 FRPN 建模	11
3.4.2 FRPN 推理步骤	11

第 4 章 系统实现及测试	13
4.1 算法实现	13
4.2 开发工具	14
4.3 系统实现	14
4.4 家庭应用、家庭建模与家庭决策仿真	17
4.4.1 扫地机器人	17
4.4.2 智能家居系统	18
4.4.3 建模与决策仿真	18
4.5 实验结果	23
4.6 实验分析与改进	27
4.6.1 实验分析	27
4.6.2 实验改进	28
第 5 章 结论	29
参考文献	30
致 谢	32

插图清单

图 3.1	网系统实例	7
图 3.2	FRPN 建模示例图	11
图 3.3	FRPN 推理步骤图	12
图 4.1	算法函数计算流程图	14
图 4.2	主页面	15
图 4.3	输入 P、R 界面	15
图 4.4	输入矩阵界面	16
图 4.5	决策界面	16
图 4.6	更改真实度界面	17
图 4.7	直接计算结果界面	17
图 4.8	客厅 FRPN 网	20
图 4.9	餐厅与厨房 FRPN 网	21
图 4.10	卫生间规则	23
图 4.11	卧室规则	24
图 4.12	书房规则	25
图 4.13	客厅真实度	25
图 4.14	餐厅与厨房真实度	26
图 4.15	卫生间真实度	26
图 4.16	卧室真实度	26
图 4.17	书房真实度	27

附表清单

表 3.1	FRPN 建模命题规则示例表格	11
表 4.1	扫地机器人的命题	19
表 4.2	智能家电命题	19
表 4.3	餐厅与厨房命题	21
表 4.4	卫生间命题	22
表 4.5	卧室命题	22
表 4.6	书房命题	24
表 4.7	决策输出表	27

第 1 章 绪论

本章主要介绍了智能机器人决策系统和模糊推理 Petri 网的相关背景与研究现状，并对本课题研究的影响和经济因素进行了一定的分析。

1.1 研究背景及意义

1.1.1 智能机器人与决策系统

智能机器人是一种收集信息、存储信息、推理信息、做出推断，模拟人类思维的一种机器人系统。它是人工智能技术的综合试验场，可以全面地检验考察人工智能各个研究领域的技术发展状况^[1]。作为被赋予智能的设备，机器人在一部分情况下可以自动作业，节省了人力。而抛开特定环境的作业，当智能机器人进入多变的环境时，虽然能使用雷达、摄像头、麦克风等工具收集信息，由于设备本身的局限性，机器人的决策能力的薄弱使其依然无法完全模拟人的行为。例如在 AUV 编队中，由于导航、探测设备的不精确，水下带宽、噪声的影响，就极大影响了编队的决策精度和协作效能^[2]。决策系统的诞生就是为了在复杂多变的情况下，使机器人基于有限、多变的信息做出正确的选择。决策系统是决策论所研究的系统，使用数学模型表述和处理输入信息的变化，从而预测接下来的输出。经典系统理论着重研究系统的输入输出关系，不涉及系统的内部结构和内部行为，而现代系统理论则同时注重两个方面的研究，在系统理论中，输入输出关系常用传递函数来描述，系统的内部行为常用状态变量来描述，并以状态变量为中介把输入和输出联系起来，这里的状态变量必须具有两个特性：1. 能全面概括系统在 t 时刻以前和 t 时刻内系统运动的全部信息；2. 根据系统现在的状态和从现在起到以后任何时刻间的输入，应能预测或完全确定那个时刻的输出，而且状态本身也得到发展。决策系统的要素有：用于分析的输入要素、用于用户手动分析的规则输入、经过计算得出的决策转换数据、根据用户标准生成的最终决策。决策系统理论上可以应用在各个领域，无论是医学诊断、业务管理还是运维调控、森林管理都有所应用。

1.1.2 Petri 网和模糊推理 Petri 网

Petri 网是用于离散事件系统的建模和分析工具^[3]。随着 Petri 网的广泛使用，从最初的一种分步运算判断方法发展到了为了解决不同问题产生的不同的 Petri 网分支。例如着色 Petri 网将每个托肯 (token) 赋值从而区分托肯 (token)，通常用 CPN

Tools 建模；层次 Petri 网将 Petri 网嵌入另一个 Petri 网作为其中的托肯 (token)，不同层次的 Petri 网之间变迁通信，形成了嵌套形式的 Petri 网；优先级 Petri 网将变迁赋予优先级，使高优先级的变迁唯一触发，低优先级的变迁则不触发，从而确定变迁触发的顺序。Petri 网还有很多扩展，其中应用较为广泛的就是模糊推理 Petri 网 (FRPN)。模糊推理 Petri 网的优势在于应用矩阵运算执行推理，同时输入的信息又可以是模糊的，使解决模糊推理问题变得更加容易。而这正是智能机器人所需要的。机器人收集到的信息通常都是片面的，将这些信息模糊化加入运算，在运算过程中将信息分类计算，再去模糊化就可以得到经过逻辑推理后的决策，从而弥补机器人对于不同情况的推理能力。Petri 网也可以应用于智能家居^[4]，从静态和动态两个方向对高级上下文进行描述，使智能家居中的上下文感知更加精确。

1.2 相关技术的现状

Petri 网^[5]是一种图形建模方法，被广泛应用于建模和分析离散事件系统，如通信、制造、运输系统。Petri 网最初的概念是由德国科学家 Carl Adam Petri 提出的^[6]。他提出了一种用于描述物理进程和物理系统的组合的网状模型。后来人们把应用这种概念发展而来的模型统称为 Petri 网，而针对模糊信息处理的模糊 Petri 网就是其中之一。刘剑刚等^[7]将普通 Petri 网模糊化，建立了通用的模糊 Petri 网模型。Lundell 等^[8]将模糊 Petri 网应用于 UAV 决策当中，证明了可以在不改变传统 Petri 网的定义、运行规则的情况下实现模糊 Petri 网。为了将模糊 Petri 网用于火灾风险评估，褚鹏宇等^[9]提出基于动态变权模糊 Petri 网的地铁站火灾风险评估模型，将繁琐推理变为简易的矩阵运算。相较于将模糊逻辑^[10]、模糊神经网络^[11]、模糊推理^[12]应用于自动驾驶决策，模糊 Petri 网可以省去样本获取和训练，也无需计算隶属度，更加直观和易用。

但是大部分对于模糊 Petri 网的研究都没有利用 Petri 网的形式来提高模糊推理的效率，而且现有的模糊 Petri 网无法处理知识库中的否定问题。于是，Gao 等^[13]正式定义了模糊推理 Petri 网的概念，提出了一种具有并行推理能力的有效推理算法。模糊推理 Petri 网还广泛应用于故障诊断^[3]、产品拆卸^[14]等方面的研究。另一方面，针对图形化和运算关联不大的问题，郝莉莉等^[2]探寻了一种支持量化计算的形式化建模、仿真和验证一体化方法——WIFTCPN。具有可操作、通用和层次化的特点。在模糊推理 Petri 网发展的同时，扩大其应用范围，同时设计一个系统使用它就很有必要了。

1.3 总体技术方案及其社会影响

本课题首先要实现一个模糊推理 Petri 网的计算系统，只要建模完毕，就可以使用系统计算一次决策。随着系统功能的完善，可以实现针对某种特定问题的模糊推理 Petri 网系统，从而实现智能决策。该系统的实现，可以扩大模糊推理 Petri 网的应用范围，也为之后的更多研究提供了方便的计算工具。

其次，本课题要将模糊推理 Petri 网结合时下流行的智能家居系统应用于扫地机器人的决策当中，使扫地机器人能够自主感知哪些房间里有人，从而优先打扫没有人的房间，实现清扫工作和用户生活互不干扰。这个策略不仅可以用于扫地机器人，智能家居设备之间互相关联、收集信息、自动决策才是未来智能家居的发展方向。虽然决策系统可以免去用户手动的管理，但也有决策失误的可能性。为了实现真正安全、高效的智能，还需要更多的技术优化。

1.4 技术方案的经济因素分析

该技术方案的性价比较高，仅需 Petri 网建模和矩阵运算比使用大量数据集训练的深度学习首先在资源需求上比较低，其次 Petri 网建模是可以重用的，同一类决策问题的建模是类似的，应用起来成本较低。并且 Petri 网的具有可视化的优点，建模直观易懂，易于上手。

1.5 论文章节安排

在接下来的章节里，本文首先在第二章介绍了智能机器人的决策系统与模糊方法相关的概念及应用，然后在第三章讲解了 Petri 网的基本原理，辅助了解 Petri 网的基础概念，并整理了推理的完整步骤。第四章，应用第三章中 FRPN 的推理步骤实现了 FRPN 智能决策系统，然后将其应用于扫地机器人的智能决策，假定了一个有五种房间的屋子做判断测试，验证了正确性。最后，我们总结了 FRPN 应用于扫地机器人智能决策的优缺点，并做了研究的展望。

第2章 智能机器人的决策与模糊决策

2.1 智能机器人的决策系统

智能决策支持系统的概念是在 1970 年代后期由 Clyde Holsapple 和 Andrew Whinston 提出的^{[15][16]}。智能决策系统通常用于规划、评估、诊断、推理。决策系统的目标是像人类一样处理收集的信息，从而判断和诊断问题，提供可行的解决方案。决策系统与人工智能的结合可以有效提高运算效率，从而接近人类的判断能力。大部分智能决策系统都是基于专家系统，将特定领域的知识与推论相结合，通过构建有一定步骤的决策模型，整理成多层决策结构。在形成输入和输出的映射关系规则后，通过算法实现智能机器人的推理和决策功能。为了解决电网协调、抗灾、评估指标的问题，文献^[17]将 GIS 技术、电力规划研究与电网规划结合，提供涵盖规划全过程的决策支持，且已投入使用。文献^[18]建立了一套食品安全风险评估决策系统，实现食品安全风险的快速、有效溯源，提高了各部门的工作效率。针对铁路运维管理难度的不断增大，文献^[19]使用多种算法构建了一个综合处理与决策平台，为信息化管理工作提供辅助决策，提升运维智能化水平。文献^[20]为足球机器人设计了决策推理模型，抽象化赛场情况，让决策系统使用视觉系统收集足球机器人动作、位姿、目标可达性信息后，对足球机器人进行动作安排。

2.2 模糊方法与决策

模糊决策的目的是为了解决在智能机器人推理过程中遇到的两个短板：收集信息途径的有限性和收集到信息的多变性。这两个短板导致的直接结果是对收集到的信息不能做到 100% 可信，也就是说要在智能机器人的逻辑判断中细化是与否的概念。模糊逻辑就是使用这些细化后的信息得到更可信的推理结果。模糊逻辑与布尔逻辑不同之处在于布尔逻辑由 0 或 1 表示状态，而模糊逻辑用 0 到 1 的值表示状态。模糊逻辑的处理步骤一般为输入值的模糊化、规则评估与聚合、去模糊化。模糊化是将输入的信息分成有隶属度的不同模糊集的过程。隶属度是 0 到 1 的值，表示信息属于集合的不确定程度。如果为 0，则该信息不属于该模糊集；如果为 1，则该信息属于该模糊集。模糊集一般代表不同的条件内容，因此在模糊化后，可以将规则和结论连接起来。规则评估则是使用 IF 语句将输入整合，并用 THEN 语句引出输出，即制定由条件推出结果的规则。去模糊化则是再使用算法寻找模糊集计算结果的重心，从计算出的值中即可得到最终的决策。

由于模糊系统输出经过了所有输入和所有规则的统一计算，模糊逻辑系统可以很好地应对不可信的输入，得到正确的输出。通过或静态设定或动态调整每个规则的权重，还可以改变不同规则的优先级以及对结果影响的大小。模糊逻辑系统的主要应用之一是医疗诊断。因为病人的身体状态可能是主观或模糊的，模糊逻辑非常适合描述病变的关键特征，从而帮助医生进行计算机辅助诊断 (CAD)^[21]。模糊逻辑在 CAD 应用领域中极有前途的可能性，但为了使其在效率、功能更进一步还需要更多研究^[22]。

第3章 Petri 网的基本原理与方法

在了解机器人决策系统和模糊决策的基础上，本章主要讲解了 Petri 网的基本原理，辅助了解 Petri 网的基础概念。并且提供了一个实例强化理解。然后本章对模糊推理 Petri 网进行了公式及理论说明，对算法的复杂度进行了分析与证明。在最后本章举例说明模糊推理 Petri 网的建模以及推理方法。

3.1 Petri 网基本知识

Petri 网作为数学建模和分析的常用工具，既有良好的数学分析功能，又有直观的图形界面，现已广泛应用于混合系统的研究^[23]。

一个简易的 Petri 网如下：

$$N = \{S, T; F\} \quad (3.1)$$

其中，S 被称为 S_元或库所 (place)，T 被称为 T_元或变迁 (transition)，F 被称为库所和变迁之间的流关系 (flow relation)。在 Petri 网模型中，一般库绘制为圆圈，变迁绘制为矩形，流关系则绘制为有向的箭头。库所只能通过流关系指向变迁，变迁也只能通过流关系指向库所。无论是库所还是变迁都不能孤立存在于模型中，即必须存在流关系将其与另一个变迁或库所连接。库所和变迁在应用场景中表示不同的概念。例如救火问题中，变迁代表水桶，库所代表运水的人。

Petri 网的另一个要素是托肯 (token)，托肯用 M 表示。托肯用于库所的使能，跟随流关系前往变迁和下一个库所。例如救火问题中，拥有托肯的库所即代表这个人处于运水状态。

对于库所，还有一个重要属性是容量 (capacity)，用 K 表示。库所的大小限制它可以承载的托肯 (token) 数量，从而对系统的运转进行控制。例如救火问题中，K 代表这个人能同时运水桶的量。

对于流关系，也有一个属性称为权 (weight)，用 W 表示。权的大小限制托肯 (token) 同时传输的数量。权还可以简化 Petri 网。

因此，一个 Petri 网系统通常由六元组表示：。其中的元素由集合表示，也可以转换为矩阵表示。

已知以上元素，即可绘制 Petri 网模型。一个模型本身可以代表一类关系，当更换其中 S、T、token 代表的东西时，就可以表示其他系统。

图 2-1 是一个网系统。由图可知，各有一个托肯 (token)，与或触发变迁后，经

过重新获得托肯 (token)。而和也能经过或重新获得托肯 (token)，从而形成循环。依据本网系统中的逻辑关系，我们可以设计一个可能的解释：中的托肯 (token) 代表一位工人，和代表机床，和代表工人使用机床加工，和代表等待组装加工的零件，和代表机床在检修状态，代表工人休息。和代表机床开动，和代表加工结束，和代表检修，代表零件组装，代表工人恢复待命。

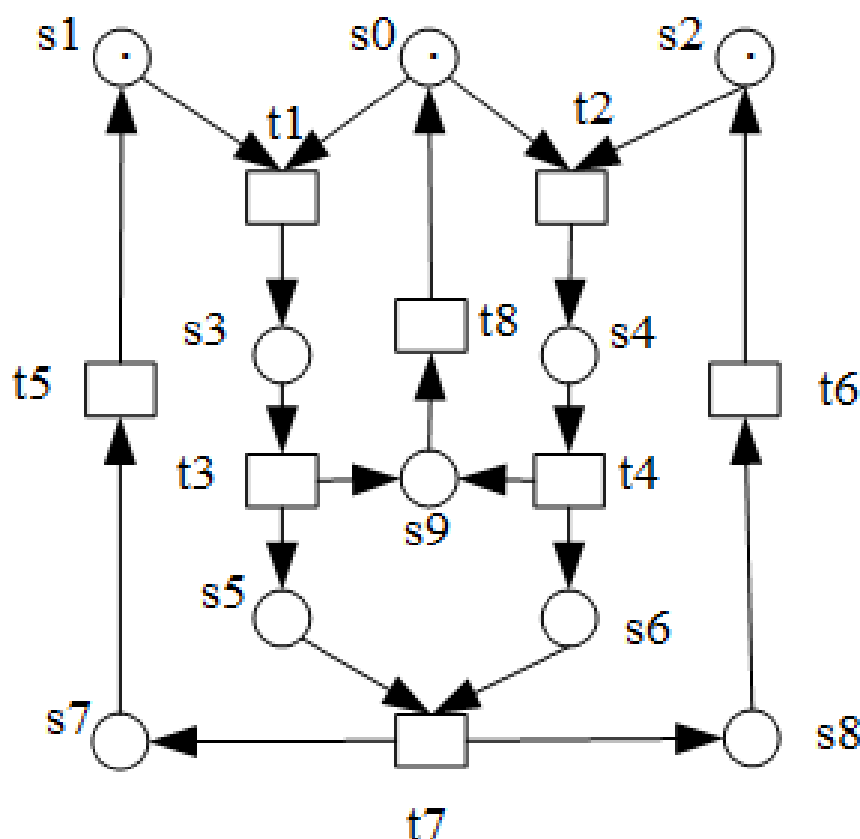


图 3.1 网系统实例

3.2 FRPN 网基本知识

作为 Petri 网的一种分支，模糊 Petri 网则是为了处理不确定信息而提出的概念。为了处理规则中的否定问题，又诞生了模糊推理 Petri 网。模糊推理 Petri 网对一般 Petri 网的改进在于将库所、变迁变为了命题和规则，用因果关系将其联系起来，而将最后的命题作为结论输出。模糊推理 Petri 网也不会构成循环回路，并且托肯 (token) 仅用于对命题进行使能而没有具体意义。还给每个命题和规则添加了置信度这个属性，从而实现模糊推理。最重要的一点是，模糊推理 Petri 网将命题和规则以及相关的所有信息用矩阵表示与运算，计算的过程与结果都很直观。

3.3 FRPN 的公式推导与理论说明

3.3.1 FRPNs 元素

模糊推理 Petri 网 (FRPNs) 可以表示为一个 8 元组:

$$\mathcal{N} = (P, R, I, O, H, \Theta, Y, C) \quad (3.2)$$

1) 命题: $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 是命题 (或称为库所) 的有限集, 命题在 Petri 网中由圆圈表示。

2) 规则: $R = \{r_{11}, r_{22}, r_{33}, \dots, r_{mm}\}$ 是规则 (或称为变迁) 的有限集, 规则在 Petri 网中由粗线表示。

3) 输入矩阵: $I = P \times R$ 是一个 $n \times m$ 的输入矩阵, 在 FRPN 图中表示该命题是规则中的一个条件, 是由命题指向规则的一条直线。 $(p_i, r_j) = 1$ 代表从 p_i 到 r_j 有直接的弧, 而 $(p_i, r_j) = 0$ 代表从 p_i 到 r_j 没有直接弧。其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 且 $j = 1, 2, \dots, m$ 。

4) 输出矩阵: $O = P \times R$ 是一个 $n \times m$ 的输出矩阵, 在 FRPN 图中表示该规则可以导出指定命题, 是由规则指向命题的一条直线。 $O(p_i, r_j) = 1$ 代表从 p_i 到 r_j 有直接的弧, 而 $O(p_i, r_j) = 0$ 代表从 p_i 到 r_j 没有直接弧。其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 且 $j = 1, 2, \dots, m$ 。

5) 增补矩阵: $H = P \times R$ 是一个 $n \times m$ 的增补弧矩阵, 在 FRPN 图中表示该命题是规则中的一个非条件, 是由命题指向规则的一条直线。 $H(p_i, r_j) = 1$ 代表从 p_i 到 r_j 有增补弧, 而 $H(p_i, r_j) = 0$ 代表从 p_i 到 r_j 没有增补弧。其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 且 $j = 1, 2, \dots, m$ 。增补弧与输入矩阵互补。在同一个 8 元组中有: $\forall p \in P, r \in R, I(p, r) \cdot H(p, r) = 0$ 。

6) 真实度向量: θ 用于表示命题的真实度。 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$, 其中 θ_i 代表命题 p_i 的真实度, $i = 1, 2, \dots, n$ 。初始真实度向量由 θ_0 表示。

7) 标记向量: γ 是一个标记向量, 负责给命题赋能。 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)^T$, 其中 $\gamma_1 = 1$ 表示 p_1 里有一个托肯 (token), 而 $\gamma_1 = 0$ 表示 p_1 没有被标记。初始标记由 γ_0 表示。托肯 (token) 在 Petri 网图中由点表示。

8) 置信矩阵: 置信矩阵代表对规则的置信度, 置信度通常由人工直接指定。 $C = \text{diag}\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, c_i 是 r_j 的置信度, $j = 1, 2, \dots, m$ 。

3.3.2 推理规则

在本文中, 所有的元组都用矩阵表示且参与运算。只要有库所、变迁、输入输出矩阵增补矩阵、标记向量就可以绘出 FRPN 图, 而有 FRPN 图也可以直接得到

库所、变迁、输入输出矩阵、增补矩阵、标记向量。具有托肯 (token) 的命题触发规则，引发 γ 值的改变从而激发建模系统的动态规则推理过程。在人工定义了属于命题的托肯 (token) 后，还需要给命题定义相应的真实度。这就是说，如果 $\theta_i = 0$, $\gamma_i = 1$ ，代表的真实度为 0；如果 $\theta_i = 0$, $\gamma_i = 0$ ，代表真实度未知。

FRPN 的推理执行规则

在引出 FRPN 的执行规则之前，先介绍规则中所用的极大代数中的两个矩阵算子。

1) \oplus : 比较两个相同矩阵对应位置的元素大小，取大值。例如 $A \oplus B = D$ ，三者均为 $m \times n$ 矩阵。 $d_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$ 其中 a,b,d 分别是 A, B, D 中的元素，ij 对应矩阵中的行列。

2) \odot : 将前者矩阵行与后者矩阵列对应元素相乘比大小，取大值。例如 $A \odot B = D$, A 与 B 的行列数相反，D 取 A 的行为行，B 的列为列。即 A 为 $m \times q$, B 为 $q \times n$, D 即是 $m \times n$. $d_{ij} = \max_{(1 \leq k \leq q)}(a_{ik} \cdot b_{kj})$. 其中 a,b,d 分别是 A, B, D 中的元素，ij 对应矩阵中的行列。

FRPN 的执行依赖规则的使能和触发。

1) 规则使能：只有当 r_j 的任意输入命题 p_i 都被标记（即 $\gamma_i = 1$ ）， r_j 才能被使能。

2) 规则触发：当 r_j 由 γ_i 使能后，在触发后得到一个新的 γ' 。

$$\gamma'(p) = \gamma(p) \oplus O(p, r_j), \forall p \in P \quad (3.3)$$

真实度向量也在触发后改变：

$$\theta'(p) = \theta(p) \oplus c_j \cdot \rho_j \cdot O(p, r_j), \forall p_i \in P \quad (3.4)$$

其中

$$\rho_j = \min_{p_i \in r_j} \{x_i | x_i = \theta_i \text{ if } I(p_i, r_j) = 1, x_i = 1 - \theta_i \text{ if } H(p_i, r_j) = 1\} \quad (3.5)$$

$$r_j = \{p_i | I(p_i, r_j) = 1 \text{ or } H(p_i, r_j) = 1, p_i \in P\}. \quad (3.6)$$

在 FRPN 中，所有使能的规则都可以同时触发。在模糊规则触发后，FRPN 的标记和真实度向量的改变如下

$$\gamma' = \gamma \oplus [O \odot \mu] \quad (3.7)$$

$$\theta' = \theta \oplus [(O \cdot C) \odot \rho] \quad (3.8)$$

其中控制向量 $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m]^T$ ，触发向量 $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m]^T$ ，当 r_j 触发后

$\mu_i = 1$ 。值得一提的是，在 FRPN 中 P_i 和 $\neg P_i$ 可以出现在同一个系统中，但两者计算方式并不相同。而增补矩阵就用于存储 $\neg P_i$ 相关的弧，并且增补矩阵中的 $\theta_i = 1 - \theta_i$ 。

在获取输入输出矩阵、增补矩阵、真实度向量、标记向量后，应用规则计算 θ' 和 γ' 并与计算前对比，若计算前后不相等，继续循环计算 θ' 和 γ' ；若前后相等， θ' 就是最终结果。

3.3.3 复杂度分析

非循环网络是一种不存在回路的网络。由 FRPN 的应用实例以及前文所述的网络构成可知，在 FRPN 中不存在循环回路。因此，我们可以认为 FRPN 是一种非循环网。

首先，我们证明在 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 并且 $\gamma^{k+1} = \gamma^k$ 时推理终止。

如果 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 并且 $\gamma^{k+1} = \gamma^k$ ，那么 $\rho^{k+1} = \rho^k$ 。

由 θ' 和 γ' 的计算公式可得， $\theta^{k+2} = \theta^{k+1}$ ， $\gamma^{k+2} = \gamma^{k+1}$ 。

依照此规律后推可知，从 $k+1$ 开始的运算结果都不再变化，说明在 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 并且 $\gamma^{k+1} = \gamma^k$ 时推理终止。

接下来设 h 为网中从库所到变迁的最长直接路径的变迁的数量。可以直接得出 θ^{h-1} 和 θ^h 除了未触发命题中的元素都是相同的。因此，设 ρ_F^h 为所有使能的规则真实度元素，并且与未触发命题的真实度无关。由此可得：

$$\rho_F^h = \rho_F^{h-1} \quad (3.9)$$

同理， $\mu^h = \mu^{h-1}$ 。由前文 θ' 的计算公式可得， $\theta^{h+1} = \theta^h$ 。由前文 γ' 的计算公式可得， $\gamma^{h+1} = \gamma^h$ 。因此，FRPN 网的推理算法迭代次数为 k ， $k \leq h+1$ ，其中 h 是在网中命题到规则的单条路径中最多规则的数量。最坏计算复杂度为 $O(nmh)$ ，其中 n 和 m 为库所、变迁的数量。由以上条件可知，推理最坏情况下在 $h+1$ 步结束。从结果而言，推理在第 h 步已经得到了正确的真实度向量，但是为了验证真实度不再改变才计算了 $h+1$ 步。因此，在 h 已知的情况下，我们可以在 h 步时直接得出最终真实度向量。多个 FRPN 也可以组合成为一个大的规则系统。在这种情况下，整体规则系统的复杂度就需要将每个子 FRPN 的复杂度相加 $\sum_i O(n_i m_i h_i)$ ，其中 n_i 、 m_i 、 h_i 分别为各个子 FRPN 的库所、变迁、库所到变迁最长路径的变迁数量。

3.4 FRPN 的实现步骤与流程图

3.4.1 FRPN 建模

在明确问题后，我们需要先对研究的对象进行建模。FRPN 建模与普通 Petri 网建模类似，都需要明确库所、变迁和库所变迁之间的流关系。而这些信息都是需要针对研究对象进行观察、整理、筛选得出的。在研究机器人这个方面，作为输入的库所，也就是 FRPN 中的输入命题代表机器人获得的信息；而变迁，也就是 FRPN 中的规则则代表机器人对已收集到信息的判断。最后，作为输出的库所，也就是 FRPN 中的输出命题就是机器人对收集到信息判断的决策。将相关的输入命题与规则建立联系，便可以得到作为输入的流关系；再将规则与输出命题建立联系，作为输出的流关系也能立马得到。这样，就完成了 FRPN 的基础建模，如表 3.1。

表 3.1 FRPN 建模命题规则示例表格

规则	输入命题	输出命题
R1	$P1, P2$	$P4$
R2	$\neg P1, P3$	$P5$
R3	$P2, P3$	$P5$

在基础建模之后，就需要对规则、命题进行进一步的明确。接下来的值都需要人工指定。首先确定 θ ，也就是命题的真实度。然后确定 C ，也就是规则的置信度。这两个信息可以专家指定。接下来需要明确哪些命题是输入命题，给它们分配托肯 (token)，这一步也就明确了 γ 标记向量。接下来就是建模的最后一步，绘制 FRPN 模型，如图 3.2。

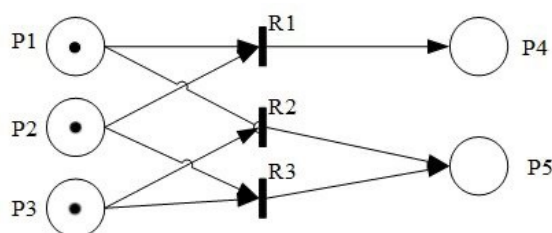


图 3.2 FRPN 建模示例图

3.4.2 FRPN 推理步骤

根据上章节对 FRPN 的推理规则分析，总结一下 FRPN 的推理步骤如图 3.3：

- 1) 输入 $P, R, I, O, H, \theta, \gamma, C$

2) 令 k 为 0

3) 计算

$$\rho^k = (I^T \odot (\bar{\gamma}^k \oplus \bar{\theta}^k)) \bar{\oplus} (H^T \odot (\bar{\gamma}^k \oplus \theta^k)) \quad (3.10)$$

4) 计算

$$\theta^{k+1} = \theta^k \oplus [(O \bullet C) \odot \rho^k] \quad (3.11)$$

5) 计算

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k \oplus [O \odot (I + H)^T \odot \bar{\gamma}^k] \quad (3.12)$$

6) 如果 $\theta^{k+1} \neq \theta^k$ 或 $\gamma^{k+1} \neq \gamma^k$, 返回 3); 如果 $\theta^{k+1} = \theta^k$ 且 $\gamma^{k+1} = \gamma^k$, 推理结束。

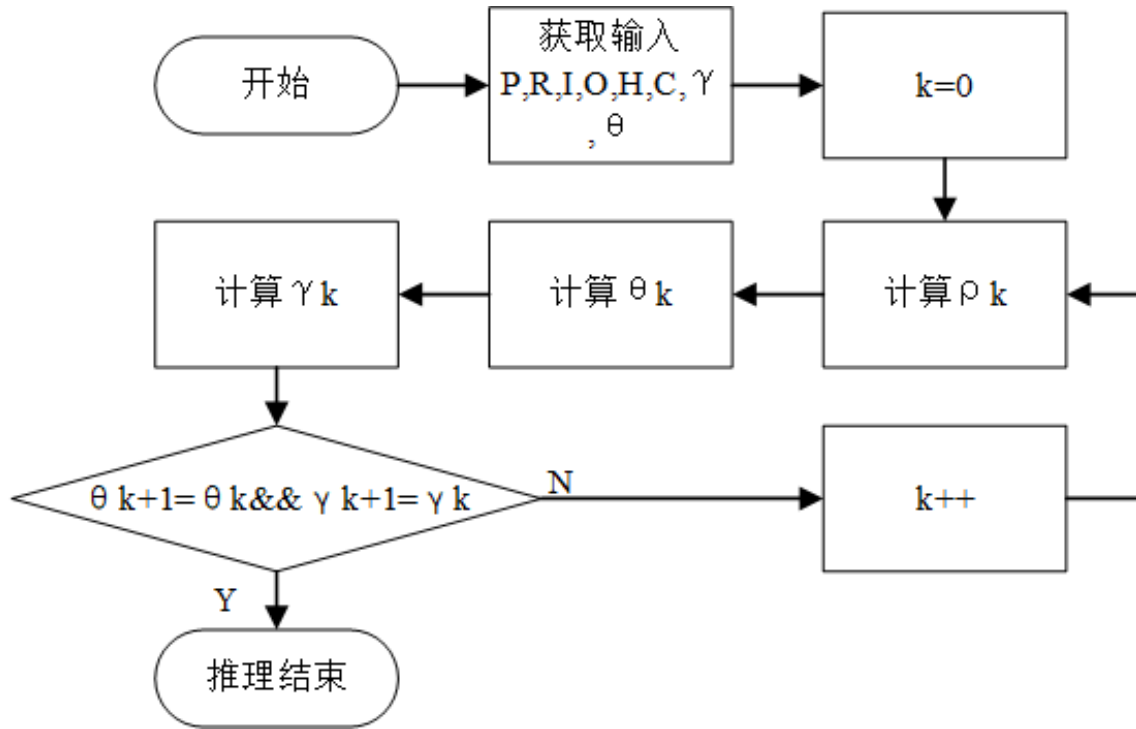


图 3.3 FRPN 推理步骤图

推理结束之后，最为重要的一点就是对推理结果进行分析。观察推理结束得出的命题真实度向量 θ^k ，首先剔除输入命题的真实度，取真实度最高的输出命题，即是本次决策的最终结果。如果系统比较复杂，由多个 FRPN 网再进行逻辑组合，那在本次决策的输出将作为输入进入下一个 FRPN 网继续决策。

第4章 系统实现及测试

在了解了 FRPN 的推理步骤后，本章将 FRPN 和 web 界面相结合，实现了基于 FRPN 的推理系统。该系统可以遵循算法，在获得输入后计算出最终真实度并选择最高值作为输出。并把算法应用在智能家居扫地机器人上，构建了 FRPN 模型，利用推理系统推理结果并验证。最后，本章总结了 FRPN 应用于扫地机器人的优缺点。

4.1 算法实现

为了实现第三章中模糊推理 Petri 网的算法，首先要确定数据的类型。P、R 的数量都可以用 int 表示，已知 P、R 就可以得到八元组中各个矩阵的大小。假设输入的 P 为 m ，R 为 n ，I、O、H 都是 $m \times n$ 二维数组，C 是 $n \times n$ 二维数组， θ 、 γ 是 $m \times 1$ 二维数组。

然后是矩阵中的各个运算。除去两个矩阵算子外，还有矩阵的点乘、矩阵的非、矩阵的加法和矩阵的转置。这些都在 Java 代码中定义为方法。

⊕：取数组对应位置的值比大小，输出到新的数组里。新的数组大小和参与运算的数组相同。方法名称 plus。

⊙：将 A 数组的行与 B 数组的列对应相乘，取所有结果中的最大值，存入新的数组。新的数组大小是 A 的行 B 的列。方法名称 multi。

矩阵点乘：将 A 数组的行与 B 数组的列对应相乘，求和存入新数组。新的数组大小是 A 的行 B 的列。方法名称 plu。

矩阵加法：数组对应位置求和。新数组大小与参与运算的数组相同。方法名称 mul。

矩阵的非：用全为 1 的数组减去当前数组。新数组大小与参与运算的数组相同。方法名称 neg。

矩阵转置：创建一个行列数和当前数组相反的数组，将当前数组的对应行存入新数组的列。方法名称 transpose。

矩阵相等判断：定义标记变量 flag，将两个数组按位比较，如果有一位不同则变化标记变量并跳出循环，返回布尔值 false。方法名称 equa。

为了使 web 中的 servlet 调用运算，主函数也被写为一种方法。首先需要输入 P,R,I,O,H, θ , γ ,C，参照 3.4.2 中的推理步骤，先将初始 θ^0 和 γ^0 存储起来，计算 ρ^k ，再计算 θ^{k+1} ，最后计算 γ^{k+1} ，然后使用 equa 方法比较 θ^0 和 θ^{k+1} 、 γ^0 和 γ^{k+1} 。如果

两个 `euqa` 函数返回都是 `true`，则输出结果；反之将此步计算结果 θ 和 γ 再次存储，并且使用新的 θ 和 γ 计算下一个 θ^{k+1} ，和 γ^{k+1} ，继续循环。具体流程如图 4.1。

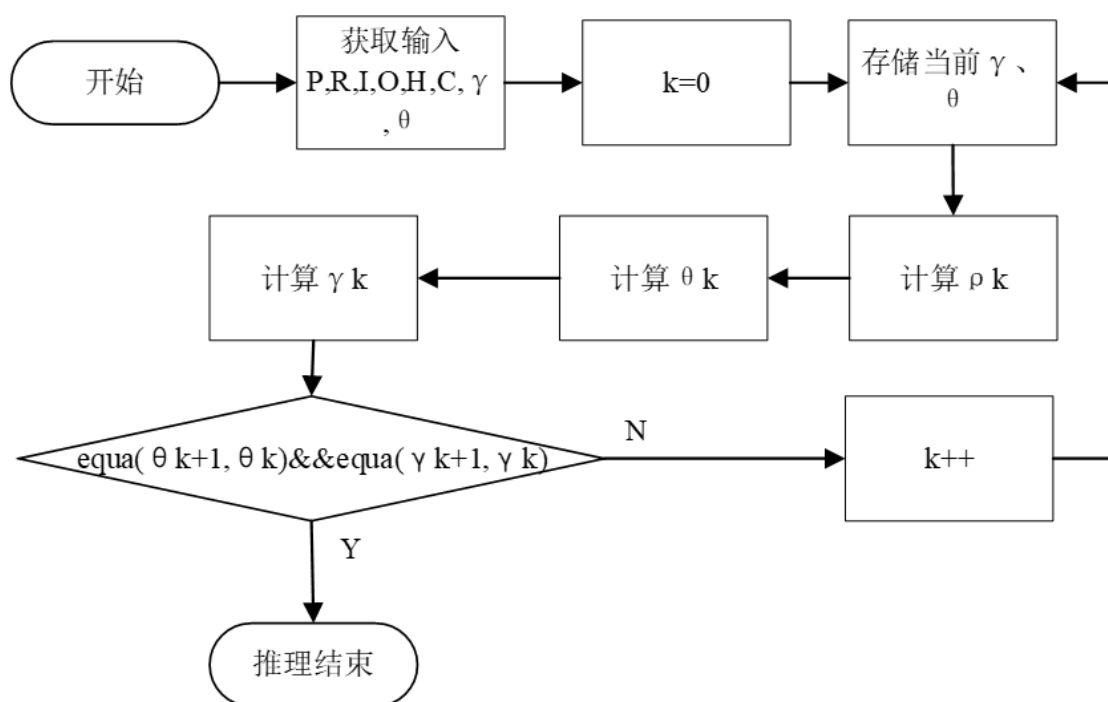


图 4.1 算法函数计算流程图

4.2 开发工具

因为目前无论是 Python、Java 还是 matlab 都没有特别好用的 Petri 网建模工具，而且建模对本项目来说只是基础，后面的数据处理依然需要自己实现。所以选择易于实现算法的 Myeclipse10 进行开发，web 项目如果搭载在服务器上可供所有人使用。本地测试使用 Tomcat6。数据存储方面，使用 MySQL 作为数据库，存储 FRPN 的八个元组，方便网页间传值。

4.3 系统实现

使用 web 实现操作界面，用户在网页按顺序输入所有元组即可得到矩阵计算的结果。主页面如图 4.2。

用户点击决策按钮后，首先需要输入 P、R 如图 4.3。

用户点击提交之后，网页中输入的值由 servlet 经 jdbc 存入 MySQL 数据库，然后在下个网页调用数据库中的值生成对应数量的输入框，如图 4.2。因为数据库中不好存数组，便将用户输入的数据连接成一个 String 存入数组。取用的时候，再按



图 4.2 主页面



图 4.3 输入 P、R 界面

位切分 String 强制转换为 double 或者 int。输入矩阵界面如图 4.4。

图 4.4 输入矩阵界面

除了输入矩阵，还需要输入输出矩阵、增补矩阵、置信度向量、真实度向量、标记向量。各个界面规则和输入矩阵的页面一致。在一步一步输入之后，数据库存有八元组的全部数据，在 result 页面使用 servlet 调用矩阵计算函数直接得出最终 θ 的值。矩阵计算之后，会自动挑选出真实度最高的命题作为推理结果，如图 4.5。

图 4.5 决策界面

用户在一次完整输入后，同一个应用场景下变化的只有真实度，因此只需点击下方可点击下方的继续推理，从而直接跳转到 θ 输入页面。在更改完 θ 值后，再次点击提交，然后点击下方直接计算结果键即可获得下一步的决策。如图 4-6、4-7。接下来要将系统应用在扫地机器人与智能家居结合的实例上，从而验证其正确性。



图 4.6 更改真实度界面



图 4.7 直接计算结果界面

4.4 家庭应用、家庭建模与家庭决策仿真

把算法应用在扫地机器人上。

4.4.1 扫地机器人

1996 年，伊莱克斯（Electrolux）推出了第一台扫地机器人，但是由于清扫不彻底、容易碰撞其他物体而导致停产。直到 2002 年的 Rommba 做到了避障，从而在商业上获得了成功。随后，除了 iRobot，国内外出现了很多品牌的扫地机器人，如戴森、小米等等。近几年，扫地机器人逐渐进入国人视野，得到了一定的普及。为了使扫地机器人更加智能，针对扫地机器人的路径规划、垃圾识别和自主导航产生了很多相关研究。由于扫地机器人无法识别地面是否有垃圾而执行清扫任务，重复工作浪费电能，李子彬等^[24]使用 SIFT 算法提取图像特征从而对垃圾进行识别，提高了清扫效率。在扫地机器人的路径规划方面，荀燕琴等^[25]证明了遗传算法可以实现点到点的最短路径寻优，在已知环境下的路径规划是可行的且具有良好的鲁棒性。在导航方面，翟敬梅等^[26]提出了一种基于“Eye-in-hand 双目视觉”和“Eye-to-hand 单目视觉”组合的移动机器人自主导航方法，达到了稳定的目标

跟踪效果。以上方法虽然解决了路径规划等问题，但没有对人是否在打扫区域内进行判断。

4.4.2 智能家居系统

智能家居设备覆盖到了方方面面。相较于传统家居，智能家居有实用性、便利性、节能性、智能化等优点^[27]。为了方便用户管控，智能家居一般都可以整合在一个平台上。国内比较优秀的平台有米家和华为的智慧生活。通过平台，可以做到对智能设备的统一调控与信息收集。本文研究的机器人是目前比较流行的扫地机器人。随着社会的不断进步与生活水平的不断提高，智能化家电越来越多的步入现代生活家庭当中。扫地机器人作为智能家电的一种，成为消费者关注的智能家电品类之一。到2017年，我国的智能扫地机器人的销量已经突破300万台^[28]。随着科技的发展，扫地机器人已经摆脱了不能越障、清扫效率低、故障率高的问题而逐渐智能化。无论是扫地、拖地还是定时清理，都可以做到省时省力。但扫地机器人作为一个自动移动的设备，如果和用户处在同一房间，很容易干扰到用户的正常行动。为了防止扫地机器人和用户互相干扰，一般都是通过设定时间定时清扫。然而定时清扫也会遇到例外情况，并不智能。既然智能家居的状态都可以在同一平台检测到，那扫地机器人完全可以通过收集其他智能家居设备的信息来判断用户此时是否在房间内，从而优先清理用户不在的房间，互不干扰。由于各个智能家居设备的状态都属于模糊信息，并不能一定确认用户的确在某个房间，那就需要模糊推理 Petri 网协助决策，从而实现扫地机器人智能打扫房间的功能。

4.4.3 建模与决策仿真

参考文献^[27]，智能家居设备是可以通过一个系统统一管理的，那么系统就有能力收集所有智能设备现在的状态。假设所有智能设备都使用 WIFI 连接系统，每个智能设备的状态都可以作为用户是否在家参照。扫地机器人是否清扫一个房间，要通过对该房间每个智能家居设备反馈的信息进行置信度计算，从而决定优先打扫哪个房间。假设一个住户家里有7个房间，分别为客厅、餐厅、厨房、阳台、卧室、卫生间、书房。由于阳台通常用于储藏，住户不经常去阳台，并且阳台没有智能家居设备，暂不考虑。除了从各个智能家居获取的信息，扫地机器人还能收集到房间地图、虚拟墙壁、自身电量和当前时间的信息。考虑到电量不足扫地机器人就应该回仓充电，对决策系统没有影响，先不考虑。

建模方式参考文献^[8]，将扫地机器人收集到的信息作为输入命题，将扫地机器人做出的决策作为输出命题，用规则联系输入命题和输出命题。根据列出的命题-规则关系表，即可绘制 FRPN 网模型。

扫地机器人自身命题

命题序号	命题意义
P1	电量充足
P2	电量不足
P3	时间白天
P4	时间黑夜

表 4.1 扫地机器人的命题

由于系统要整理所有房间的信息做出决策，就要先对每个房间的命题、规则进行整理。客厅：客厅的智能家居一般为智能窗帘、智能电视、智能音箱、智能空调。

表 4.2 智能家电命题

命题序号	命题意义
P5	空调使用中
P6	空调未使用
P7	窗帘使用中
P8	窗帘未使用
P9	吊灯使用中
P10	吊灯未使用
P11	电视使用中
P12	电视未使用
P13	音箱使用中
P14	音箱未使用

规则是输入序列和决策结果的映射，一组或多组输入对应一个决策结果。

指定

$$\theta = \{0.8, 0.3, 0.5, 0.2, 0.5, 0.6, 0.3, 0.1, 0.8, 0.7, 0.4, 0.1, 0, 0\}$$

$$C = \{0.2, 1, 0.8, 0.7, 0.9, 0.9, 0.8, 0.8, 0.7\}$$

餐厅与厨房：餐厅的智能家居比较少，除了吊灯以外没有其他设备。由于厨房和餐厅位置很接近，并且使用厨房就需要使用餐厅，在系统中暂作为一个房间看待。厨房的智能家居有智能冰箱、智能烟灶、自动洗碗机。

规则是输入序列和决策结果的映射，一组或多组输入对应一个决策结果。

指定

图 4-10 客厅规则

规则	输入						决策结果
	空调	窗帘	吊灯	电视	音箱	时间	
R1		P8		P11		P3	不打扫 (P16)
R2	P6		P10	P12	P14		打扫 (P15)
R3	P6		P10	P12	P13		打扫 (P15)
R4		P7	P10			P3	打扫 (P15)
R5	P5			P11			不打扫 (P16)
R6	P5				P13		不打扫 (P16)
R7	P5		P9			P4	不打扫 (P16)
R8			P9	P11		P4	不打扫 (P16)
R9			P9		P13	P4	不打扫 (P16)

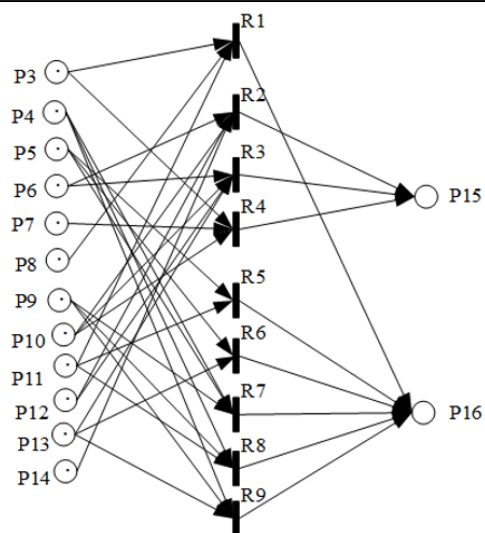


图 4.8 客厅 FRPN 网

表 4.3 餐厅与厨房命题

命题序号	命题意义
P17	冰箱使用中
P18	冰箱未使用
P19	烟灶使用中
P20	烟灶未使用
P21	洗碗机使用中
P22	洗碗机未使用
P23	吊灯使用中
P24	吊灯未使用

规则	输入					决策结果
	冰箱	烟灶	洗碗机	吊灯	时间	
R10	P18	P20	P22	P23	P3	打扫 (P25)
R11	P17			P23	P4	不打扫 (P26)
R12	P18	P20		P24	P4	打扫 (P25)
R13	P17	P19			P3	不打扫 (P26)
R14			P21	P23	P4	不打扫 (P26)
R15	P18	P19		P24		打扫 (P25)

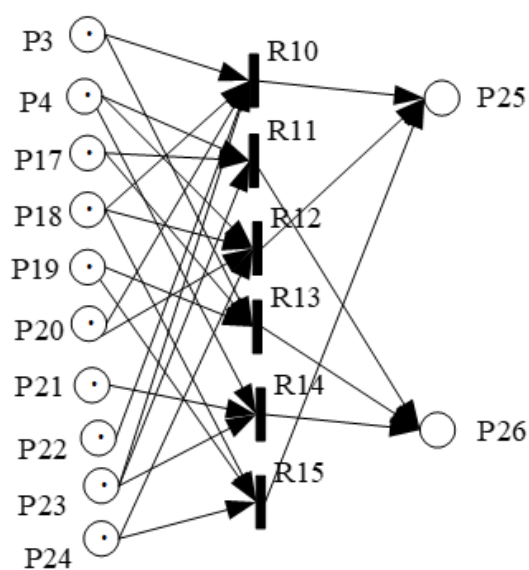


图 4.9 餐厅与厨房 FRPN 网

$$\theta = \{0.4, 0.8, 0.7, 0.8, 0.3, 0.2, 0.5, 0.1, 0.7, 1, 0, 0\}$$

$$C = \{1, 0.9, 1, 1, 0.5, 0.5\}$$

卫生间：卫生间的智能设备有智能洗衣机、智能热水器、智能马桶、吊灯。

表 4.4 卫生间命题

命题序号	命题意义
P27	洗衣机使用中
P28	洗衣机未使用
P29	热水器使用中
P30	热水器未使用
P31	马桶使用中
P32	马桶未使用
P33	吊灯使用中
P34	吊灯未使用

规则是输入序列和决策结果的映射，一组或多组输入对应一个决策结果。

指定

$$\theta = \{0.9, 0.3, 0.9, 0.1, 0.9, 0.7, 0.3, 0.5, 0.9, 0.2, 0, 0\}$$

$$C = \{0.9, 1, 1, 0.8, 1\}$$

卧室：卧室的智能家居有智能窗帘、智能加湿器、吊灯、智能床头灯。

表 4.5 卧室命题

命题序号	命题意义
P37	窗帘使用中
P38	窗帘未使用
P39	加湿器使用中
P40	加湿器未使用
P41	吊灯使用中
P42	吊灯未使用
P43	床头灯使用中
P44	床头灯未使用

规则是输入序列和决策结果的映射，一组或多组输入对应一个决策结果。

指定

规则	输入					决策结果
	洗衣机	热水器	马桶	吊灯	时间	
R16	P28	P30	P32			打扫 (P35)
R17	P27		P32	P34	P4	打扫 (P35)
R18			P31			不打扫 (P36)
R19			P32	P34	P3	打扫 (P35)
R20		P29	P32	P33	P4	不打扫

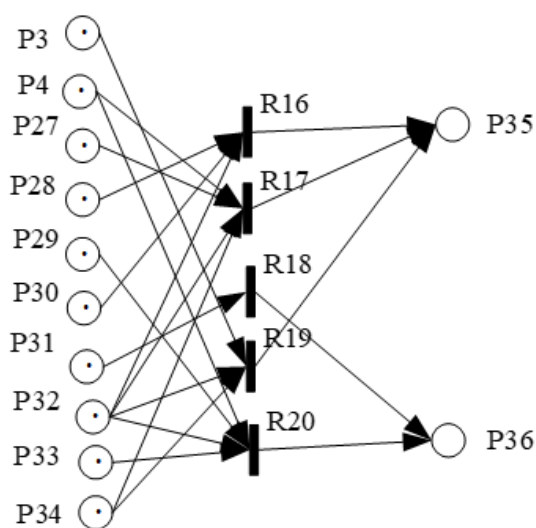


图 4.10 卫生间规则

$$\theta = \{1, 0.5, 0.7, 0.4, 0.1, 0.6, 0.2, 0.1, 0.1, 0.2, 0, 0\}$$

$$C = \{1, 0.9, 0.9, 1, 1, 0.8, 0.9\}$$

书房：书房的智能家居不多，只有智能台灯和吊灯。但是还可以通过监测笔记本电脑是否连接 WiFi 来作为判断依据。

规则是输入序列和决策结果的映射，一组或多组输入对应一个决策结果。

4.5 实验结果

接下来将建模完毕的 FRPN 网模型转化为矩阵 I, O, H, γ ，并且输入上一节指定好的 θ 和 C 。针对 4.3 中的 5 个应用场景，分别运行算法求解，每个房间的真实度计算结果展示在下文图中。已知每个运算命题中的最后两个就是作为输出的命题，则只需关注真实度 θ 的最后两位，比较它们的大小即可。

由图 4-24 可知，经过计算得出的客厅真实度 $P15=0.10$ ， $P16=0.45$ 。取真实度最高的输出命题 $P16$ 作为决策，真实度为 0.45。

由图 4-25 可知，经过计算得出的餐厅与厨房真实度 $P25=0.63$ ， $P26=0.30$ 。取

规则	输入					决策结果
	窗帘	加湿器	吊灯	床头灯	时间	
R21	P37		P41		P3	不打扫 (P46)
R22	P38	P40	P41		P3	打扫 (P45)
R23		P40		P43	P3	打扫 (P45)
R24			P42	P44	P4	打扫 (P45)
R25				P43	P4	不打扫 (P46)
R26		P39				不打扫 (P46)
R27			P41		P4	不打扫 (P46)

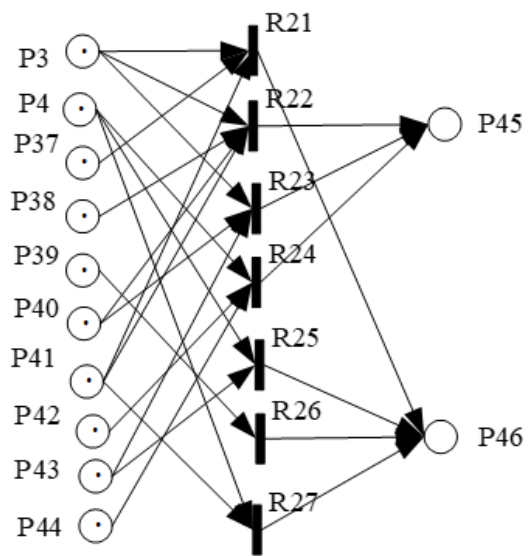


图 4.11 卧室规则

表 4.6 书房命题

命题序号	命题意义
P47	台灯使用中
P48	台灯未使用
P49	吊灯使用中
P50	吊灯未使用
P51	笔记本使用中
P52	笔记本未使用

规则	输入				决策结果
	台灯	吊灯	笔记本	时间	
R28		P49		P3	打扫 (P53)
R29	P47		P51	P4	不打扫 (P54)
R30		P49	P51	P4	不打扫 (P54)
R31	P47		P52	P4	不打扫 (P54)
R32	P48	P50		P4	打扫 (P53)

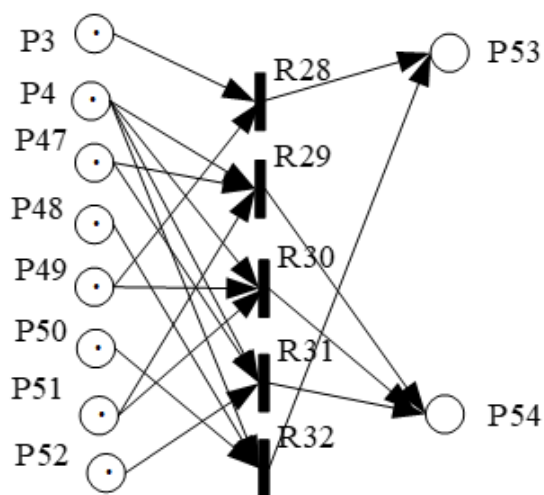


图 4.12 书房规则



图 4.13 客厅真实度



图 4.14 餐厅与厨房真实度

真实度最高的输出命题 P25 作为决策，真实度为 0.63。



图 4.15 卫生间真实度

由图 4-26 可知，经过计算得出的卫生间真实度 P35=0.20，P36=0.30。取真实度最高的输出命题 P36 作为决策，真实度为 0.30。



图 4.16 卧室真实度

由图 4-27 可知，经过计算得出的卧室真实度 P45=0.18，P46=0.20。取真实度最高的输出命题 P46 作为决策，真实度为 0.20。

由图 4-28 可知，经过计算得出的书房真实度 P53=0.32，P54=0.18。取真实度



图 4.17 书房真实度

最高的输出命题 P53 作为决策，真实度为 0.32。

经过整理得出如下决策表：

表 4.7 决策输出表

房间	决策	真实度
客厅	不打扫 (P16)	0.45
餐厅和厨房	打扫 (P25)	0.63
卫生间	不打扫 (P36)	0.3
卧室	不打扫 (P46)	0.2
书房	打扫 (P53)	0.32

4.6 实验分析与改进

4.6.1 实验分析

由各个房间得出的决策和真实度进行排序，首先打扫餐厅和厨房，然后打扫书房。客厅、卫生间和卧室都是决策不打扫的，扫地机器人在打扫完餐厅和厨房、书房后回充电仓待命。如果接下来收集到的信息有所改变，导致决策发生改变，就继续清扫其他房间。接下来根据输入的初始真实度分析决策的正确性。需要注意的是，在正式使用时时间早晚是同时输入给所有子系统的，本测试数据早晚时间是随机的。

客厅指定 $\theta = \{0.8, 0.3, 0.5, 0.2, 0.5, 0.6, 0.3, 0.1, 0.8, 0.7, 0.4, 0.1, 0, 0\}$ ，代表早晨空调开启，窗帘没拉，吊灯没关，电视机和音箱开着，说明住户虽然白天忘了关吊

灯，但依然很可能在客厅观看电视，决策给出的不打扫符合常理。

餐厅和厨房指定 $\theta = \{0.4, 0.8, 0.7, 0.8, 0.3, 0.2, 0.5, 0.1, 0.7, 1, 0, 0\}$ ，代表在夜晚时冰箱、烟灶都并未使用，只有洗碗机在运行，说明住户已经吃完饭离开房间，决策系统给出打扫符合常理。

卫生间指定 $\theta = \{0.9, 0.3, 0.9, 0.1, 0.9, 0.7, 0.3, 0.5, 0.9, 0.2, 0, 0\}$ ，代表早晨洗衣机和热水器都开着，吊灯也开着，马桶并未使用。说明住户在洗澡，决策系统给出不打扫符合常理。

卧室指定 $\theta = \{1, 0.5, 0.7, 0.4, 0.1, 0.6, 0.2, 0.1, 0.1, 0.2, 0, 0\}$ ，代表早晨窗帘拉开了吊灯，床头灯和加湿器并未使用。说明住户拉住窗帘开灯，表明还在卧室，决策给出不打扫符合常理。

书房指定 $\theta = \{0.4, 1.0, 0.5, 0.6, 0.7, 0.5, 0.1, 0.2, 0, 0\}$ ，代表晚上台灯和电脑关闭，但是吊灯开着，说明住户不一定在书房，决策系统给出打扫符合常理。

4.6.2 实验改进

本次实验虽然推理基本正确，依然有改进空间。首先在建模阶段，仅对每台设备设置了在使用和不在使用两个状态，其实智能家居设备还有很多状态。比如智能吊灯灯光亮度、智能电视机播放的节目、智能音箱是放本地音乐还是作为声音输出设备。细化这些细节可以让推理的准确率更高。另一方面，命题之间的非逻辑没有使用到。在建模中如果继续细化逻辑，对结果准确率的提升也会很大。

其次是在算法使用过程中，系统的输入过于繁琐。比如输入矩阵中作为结论的命题一定为 0，那就不需要让用户填写；作为标记托肯 (token) 赋值的 γ 矩阵在确定哪些命题是输入命题后通常也可以自动完成不需要输入。如果能实现可视化的自动 FRPN 模型转矩阵功能，系统易用性会上一个更高的台阶。

最后是在各个房间数据协同过程中，仅仅是拿出单个房间计算后的信任度进行对比，而没有将各个房间输出继续构建成系统计算，有可能影响到准确度。而且扫地机器人本身的电量、雷达获取的数据也应该放入模型中参与推理。另外对房间打扫顺序也需要对路程、工作量等信息进行考量，房间是否有人这个信息仅仅是规划打扫顺序的一部分。如果要设计节能、高效的完整打扫规划，还需要如神经网络等其他技术的帮助。

第 5 章 结论

本课题简单论述了智能机器人与决策系统的发展现状和 Petri 网的一些特性。为了将 Petri 网应用在推理决策系统和模糊系统中,前人发明了模糊 Petri 网 (FRPN)。使用 Petri 网可以有效地进行系统的分析与模糊推理。本文分析并实现了 FRPN 的典型算法。然后将其在智能家居中进行了应用。本文结合实际情况分析了家具设备推理系统需要考虑到的各类因素,并进行了整理和量化。在此之上运行算法,得到合理的推理结果。本课题利用了 Petri 网图形化的优势和矩阵运算的数学优势,得到的结果与实际情况基本一致,可以作为打扫规划的一种参考。智能家居系统信息统计处理的思路同样可以应用于其他智能家居设备。本课题还验证了模糊推理 Petri 网具有解决复杂问题的潜力,将多个模糊推理 Petri 网结合或者将模糊推理 Petri 网与神经网络结合^[29]会是未来研究的方向。进一步的工作也可以为 FRPN 设计更友好的、更通用的系统,成为一个广泛应用的工具。

参考文献

- [1] 陈建平, 任斌, 张会章. 人工智能在智能机器人领域中的研究与应用[J]. 东莞理工学院学报, 2008, 03(4): 33-37.
- [2] 郝莉莉, 顾浩, 康凤举, 等. 不确定条件下 AUV 编队决策系统的 WIFTCPN 形式化建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 08(4): 86-92.
- [3] 高梅梅, 吴智铭. 模糊推理 Petri 网及其在故障诊断中的应用[J]. 自动化学报, 2000, 026(005): 677-680.
- [4] 张星. 基于 Petri 网的智能家居原型系统的设计与分析[Z]. 华东理工大学, 2013.
- [5] Zhou M. Modeling, simulation, and control of flexible manufacturing systems[M]. World Scientific, 1998.
- [6] C.A.Petri. Kommunikation mit automaten[D]. Institut für Informatik, Bonn, Germany, 1962.
- [7] 刘剑刚, 高洁, 王明哲. 模糊 Petri 网及其在模糊推理中的应用[J]. 计算机仿真, 2004, 11(4): 152-154.
- [8] M L, J T, K N. Fuzzy petri net for uav decision making[C]//Collaborative Technologies and Systems, 2005. Proceedings of the 2005 International Symposium on. IEEE Computer Society, 2005.
- [9] 褚鹏宇, 刘澜, 尹俊淞. 基于动态变权模糊 Petri 网的地铁火灾风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 016(006): 39-44.
- [10] Sara, Saved, M A. 基于模糊逻辑的智能驾驶关键技术研究[Z]. 2013.
- [11] 王韦钰, 曲仕茹. 基于模糊神经网络的自动驾驶决策系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(09): 1711-1713.
- [12] 邱小平, 马丽娜. 基于模糊推理的车辆换道分析研究[J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2016, 035(004): 121-126.
- [13] M G, C Z M, X H, et al. Fuzzy reasoning petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics Part A Systems Humans, 2003, 33(3): 314-324.
- [14] 赵树恩, 李玉玲. 模糊推理 Petri 网及其在产品拆卸序列决策中的应用[J]. 控制与决策, 2005, 10(4): 103-106+110.
- [15] Holsapple C W. Framework for a generalized intelligent decision support system[M]. Purdue University, 1977.
- [16] Holsapple C W, Whinston A B. Business expert systems[M]. 1987.
- [17] 周鲲鹏, 方仍存, 颜炯, 等. 电网规划智能辅助决策系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 77-82.
- [18] 任鹏程, 苏亮, 陈思, 等. 基于电子溯源建立食品安全风险评估决策系统[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(02): 206-211.

-
- [19] 陈刚, 夏雷, 李林, 等. 铁路局信息系统状态诊断与辅助管理决策系统的研究[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(03): 32-37.
- [20] 吴丽娟, 张春晖, 徐心和. 足球机器人决策系统推理模型[J]. 东北大学学报, 2001, 06(4): 9-11.
- [21] Yanase J, Triantaphyllou E. A systematic survey of computer-aided diagnosis in medicine: Past and present developments[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 129.
- [22] Yanase J, Triantaphyllou E. The seven key challenges for the future of computer-aided diagnosis in medicine[J]. International Journal of Medical Informatics, 2019, 129.
- [23] Chen G, Li J, Yang Y. Stability analysis for differential petri net[J]. Control Decision, 2007, 22(11).
- [24] 李子彬, 许弘儒, 马惜平. 基于 AI 扫地机器人的垃圾识别的研究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(03): 190-191.
- [25] 荀燕琴, 田竹梅, 任国风, 等. 基于遗传算法的智能扫地机器人路径规划研究[J]. 高师理科学刊, 2020, 40(03): 56-60.
- [26] 翟敬梅, 刘坤, 徐晓. 室内移动机器人自主导航系统设计与方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(04): 890-899.
- [27] 陈成瑞, 王旭康, 肖欣悦, 等. 智能家居控制系统设计与实现[J]. 无线电工程, 2020, 50(05): 410-414.
- [28] 刘计良, 苗鹏, 李俊. 扫拖机器人的关键技术及对未来发展趋势的分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2020, 05(4): 82-83+110.
- [29] X L, W Y. Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy petri net framework [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics. Part C, 2000, 30(4): 442-450.

致 谢

2020 年是艰难的一年，全世界都经历着一次磨难，我们也是。没有人会想到自己会以这种方式和自己大学生涯告别，但是我们依然乐观地坚持，相信与母校久别有期，定将重逢。

上高中的时候，以为上大学就是新生活的开始；现在才发现，大学毕业才是新生活的开始。这四年，多少次水杉林旁的路过，多少次紫霞湖畔的驻足，多少次田径场上的挥汗，多少次自习室里的忙碌，多少次院办路上的跋涉，早已成为了生活中不可或缺的一部分。感谢学校给我们带来的如此精彩的四年时光，没有什么能比在学校生活更让我满足的了。

但回忆终究是回忆，每个少年都要迈出自己的下一步，我的课题正是如此。当初选题很困难，感谢导师选择我作为他的学生。虽然这是一个我没有学习过的方向，导师依然鼓励我进行研究。从最初接触课题的迷茫，到后来的认真研习、敲定研究方向，都离不开导师对我在研究问题上的指导。正是在我、导师、每位教育过我的老师的共同贡献之下，我才能将我的课题、我的大学生涯完成。

步入社会，对我们来说都是一个陌生的课题。我也迷茫，我也恐惧。但我知道，只有经验和知识可以消除恐惧。这四年，我不仅学习到了知识，还有宝贵的学习、生活经验。这些东西，有的是直接给我的，有些是潜移默化影响到我的，都是对我而言宝贵的财富。感谢每一位同学，和我一起承担压力，也和我分享学习生活中的快乐，让我真正获得了心理的成长。

为什么要读大学？我一开始以为是为了更好的工作或名声。后来才发现，一方面是大学对人格的熏陶，另一方面更是让自己了解到底什么是学习。学习不再是别人领着你的事，学习变成了要你自己在无知之海扬帆前进、成为别人指路灯塔的事。在学习的这条路上，或许会让自己变得更加艰苦。但学习的真正意义，恰恰在于用学习创造价值。不求有所获，但要有所创造，这才是每位学子真正要追求的东西。我也要带着这个信念，继续在无知之海乘风破浪。大学四年结束，但学习，永不止步。