



模糊控制算法——C语言版本

此工程为C语言版本的模糊控制算法，我将在这里提供模糊控制算法的核心及相关的示例项目。

- 模糊控制算法——C语言版本
 - 1. 工程框架
 - 1.1 数据结构
 - 1.1.1 模板式单向链表
 - 谓词和事件回调函数指针
 - 默认谓词和回调函数
 - 链表操作API
 - 链表节点操作API
 - 参数获取API
 - 1.1.2 模糊运算
 - 1.2 算法核心框架
 - 1.2.1 模糊输入
 - 1.2.2 模糊推理
 - 规则库
 - 1.2.3 模糊输出
 - 1.3 算法外围框架
 - 1.3.1 输入数据模糊化
 - 1.3.2 输出数据清晰化

1. 工程框架

1.1 数据结构

1.1.1 模板式单向链表

模板式单向链表能够存放各种类型的数据，在实际结构中使用 `void* data` 指针进行管理。

```
struct list
{
    void *data;
    struct list *next;
};
```

由于 `list.data` 是 `void*` 类型，没办法在指针库中对数据进行更多的操作，因此需要使用时传入谓词或事件回调函数等对数据进行操作。

库中链表的操作函数如下：

谓词和事件回调函数指针

名称	参数	返回值	描述
<code>list_pred</code>	<code>list_node,void*</code>	<code>bool</code>	谓词，通常用于确定是否是指定节点，
<code>list_node_data_construct_cb</code>	<code>void*</code>	<code>bool</code>	节点参数构造函数
<code>list_node_data_deconstruct_cb</code>	<code>void*</code>	<code>bool</code>	节点参数析构函数
<code>list_event_cb</code>	<code>list_node,void*</code>	<code>bool</code>	事件回调函数，可用于操作节点参数

默认谓词和回调函数

名称	参数	返回值	描述
<code>list_pred_true</code>	<code>list_node,void*</code>	<code>bool</code>	默认真谓词
<code>list_pred_false</code>	<code>list_node,void*</code>	<code>bool</code>	默认假谓词

链表操作API

名称	参数	返回值	描述
<code>list_create</code>	-	<code>list_head</code>	创建链表句柄（头节点）
<code>list_clear</code>	<code>list_head,list_node_data_deconstruct_cb</code>	<code>bool</code>	清空链表中的节点
<code>list_delete</code>	<code>list_head,list_node_data_deconstruct_cb</code>	<code>bool</code>	删除链表（包括链表中的节点和
<code>list_length</code>	<code>list_head</code>	<code>list_index</code>	获取链表长度（链表中的节点数

链表节点操作API

名称	参数	返回值	
list_node_is_on_list	list_head,list_node	bool	判断
list_find_prev_node	list_head,list_node	list_node	查找
list_find_next_node	list_head,list_node	list_node	查找
list_push	list_head,void*,size_t	bool	向链
list_pop	list_head	bool	将链
list_find_if	list_head,void*,list_pred	list_node	在链
list_push_if	list_head,void*,size_t,list_pred,list_node_data_construct_cb	bool	向链
list_pop_if	list_head,void*,list_pred,list_node_data_deconstruct_cb	bool	将链
list_remove_if	list_head,void*,list_pred,list_node_data_deconstruct_cb	bool	移除
list_swap_if	list_head,void*,void*,list_pred,list_pred	bool	交换
list_trav	list_head,void*,list_event_cb	bool	遍历

参数获取API

名称	参数	返回值	描述
list_get_first_node	list_head	list_node	获取链表中的第一个节点， 如果链表是
list_get_last_node	list_head	list_node	获取链表中的最后一个节点， 如果链表
list_get_node_data	list_head,list_index	void*	获取指定索引处节点的数据
list_get_node_data_if	list_head,void*,list_pred	void*	获取满足谓词描述的节点的数据

1.1.2 模糊运算

模糊运算是进行模糊推理的基础， 在这里， 仅讨论对模糊矩阵的运算。

为了实现模糊矩阵运算， 首先得有一个表示模糊矩阵的数据类型：

```

/**
 * @brief Fuzzy matrix
 *
 * @memberof mat matrix
 * @memberof row matrix rows
 * @memberof col matrix columns
 */
struct fuzzy_matrix
{
    fuzzy_number** mat;
    fuzzy_size row;
    fuzzy_size col;
};

```

该数据类型使用二维指针对模糊矩阵进行管理，因此涉及到了动态内存分配，这是很危险的，所以我们需要将危险放在模块中，尽量避免使用者造成内存泄漏，我创建了以下几个函数，用于管理模糊矩阵。

名称	参数	返回值	
fuzzy_matrix_init	struct fuzzy_matrix*	bool	初始化模糊矩阵
fuzzy_matrix_create	struct fuzzy_matrix*,fuzzy_size,fuzzy_size	bool	创建指定行数和列数的模糊矩阵
fuzzy_matrix_reshape	struct fuzzy_matrix*,fuzzy_size,fuzzy_size	bool	使用 <code>realloc</code> 重新分配内存
fuzzy_matrix_reshape_s	struct fuzzy_matrix*,fuzzy_size,fuzzy_size	bool	更加安全的 <code>realloc</code>
fuzzy_matrix_clear	struct fuzzy_matrix*	bool	将矩阵中的每个元素置为0
fuzzy_matrix_pay_tribute	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	纳贡函数，皇朝向藩属国进贡
fuzzy_matrix_rob	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	抢夺函数，国与国之间抢夺资源
fuzzy_matrix_delete	struct fuzzy_matrix*	bool	销毁创建的模糊矩阵
fuzzy_matrix_copy	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	将源模糊矩阵复制到目标矩阵
fuzzy_matrix_copy_just_elem	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,fuzzy_size,fuzzy_size	bool	仅赋值对应位置的元素

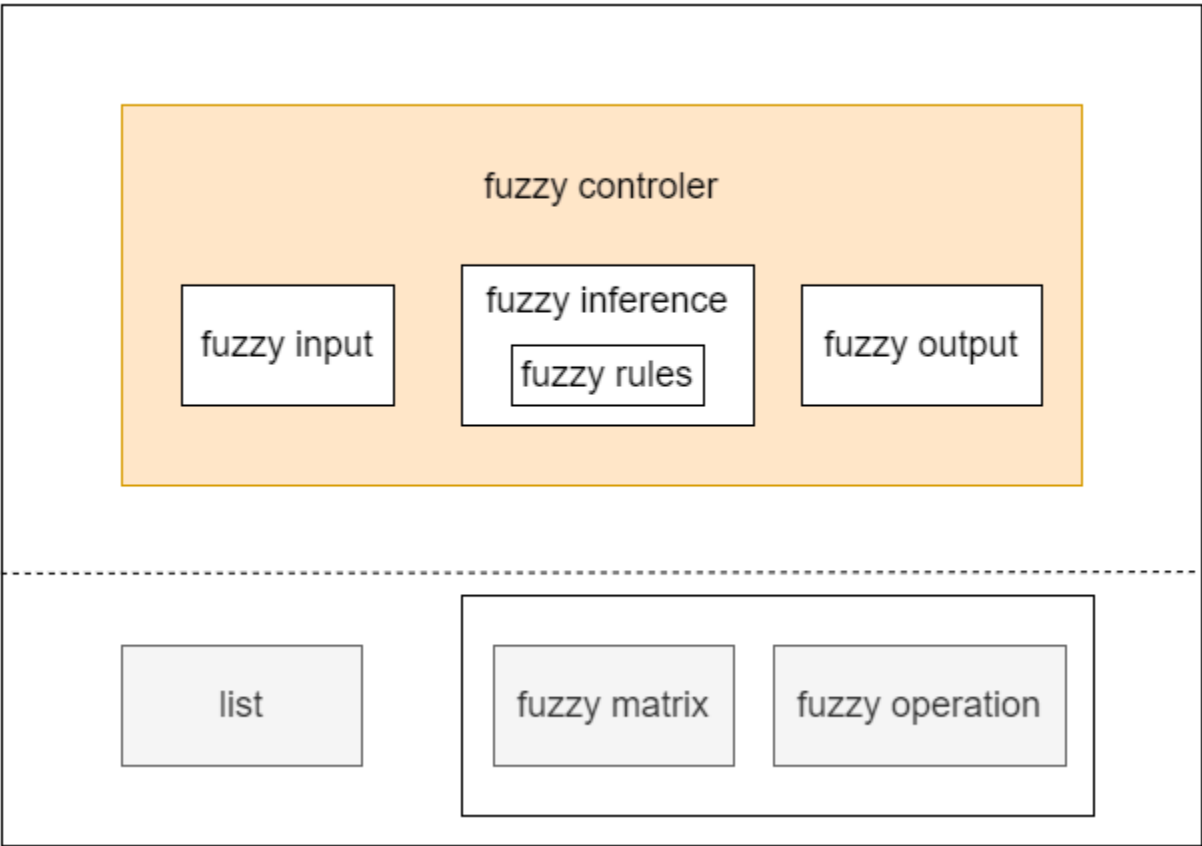
名称	参数	返回值	
fuzzy_matrix_horzcat	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	对两个矩阵进行水平连接，返回的矩阵的维数为 [n, m1+m2]。参数 dst 为指向返回矩阵的指针。
fuzzy_matrix_vertcat	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	对两个矩阵进行垂直连接，返回的矩阵的维数为 [n1+n2, m]。参数 dst 为指向返回矩阵的指针。
fuzzy_matrix_repmat	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,fuzzy_size,fuzzy_size	bool	将矩阵堆叠，返回的矩阵的维数为 [n1, n2, m]。参数 dst 为指向返回矩阵的指针。
fuzzy_matrix_trav	struct fuzzy_matrix*,void*,fuzzy_opera_event_cb	bool	遍历矩阵，并调用回调函数。参数 dst 为指向返回矩阵的指针。
fuzzy_matrix_print	struct fuzzy_matrix*,const char*	-	打印出矩阵中的元素。

除了这些对模糊矩阵内存的操作以外，还需要对模糊矩阵进行运算。

名称	参数	返回值	
fuzzy_opera_trans	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	模糊矩阵转置，如果以自己为模板或者没有给模板，则返回的矩阵的维数为 [m, n]。参数 matT 为指向返回矩阵的指针。
fuzzy_opera_dir_pro	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	求模糊矩阵的直积。相比于 fuzzy_opera_dir_pro_s 实现，如果以自己为模板或者没有给转置模板，则返回的矩阵的维数为 [n1, n2, m]。
fuzzy_opera_dir_pro_s	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	求模糊矩阵的直积。注意，如果直积失败，则返回的矩阵的维数为 [n1, n2, m]。
fuzzy_opera	struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*,struct fuzzy_matrix*	bool	实现矩阵的模糊运算，如果模糊运算失败，则返回的矩阵的维数为 [n1, n2, m]。

1.2 算法核心框架

算法核心框架图如下：



核心需要使用链表和一些基本的模糊矩阵及其运算，在它们的基础之上，搭建起模糊控制器，其包括输入输出和推理三大功能。

1.2.1 模糊输入

模糊输入部件需要记录单个论域的不同模糊子集，我将论域的名称称为 **名字**，将模糊子集的名称称为 **标签**，它们组成一对名字——标签对，用于后续辨别各个模糊子集，另外呢，它还需要能够实现将精确值模糊化的功能，因此我添加了一个模糊化函数，其相关API如下：

名称	参数	返回值	
fc_input_register	struct fc_input* const,const char*	bool	注册一个模糊输入对象，其名称为名字，模糊子集名称为标签
fc_input_unregister	struct fc_input* const	bool	注销模糊输入对象

名称	参数	返回值	
fc_input_add_fuzzy_set	const struct fc_input* const,const struct fuzzy_set*	bool	向模糊输入对象添加一个模糊子集
fc_input_clear_fuzzy_set	const struct fc_input* const	bool	清空模糊输入中的模糊子集
fc_input_fuzzing	struct fc_input* const,accurate_number*,fc_size	bool	进行模糊化
fc_input_print_data	struct fc_input* const,const char*	bool	打印经过模糊化后的数据
fc_input_print_fuzzy_set	struct fc_input* const,const char*	bool	打印模糊输入对象中的模糊子集

1.2.2 模糊推理

规则库

规则库的实现是模糊推理的关键一步，我希望有一个方便用户使用、能够较为轻松解析的规则实现，借助于先前编写的 `StreamDeviceAT`，决定使用字符串作为规则条目，并附加一些规则编写规范，那么就能轻松解析了。

现在对具体需求进行分析，首先，需要制定规则编写规范，我希望的规则是下面这样的：

```
"IF A1 AND B2 OR C3 THEN U8"
```

上述规则中存在关键词 `IF`、`AND`、`OR`、`THEN`，这些关键词需要保留，用户不能将其作为输入和输出的名称及标签，不过其中的输入和输出并不好区分哪一部分是名称，那一部分是标签，需要进一步设计：

```
"IF A-1 AND B-2 OR C-3 THEN U-8"
```

现在我们可以很好地区分名称和标签了，接下来的问题就是怎么设计多输出呢，多输出的各个输出之间并没有关系，无法使用 `AND` 或者 `OR` 对其进行辨别，因此我选择再添加一个关键词 `|`，其使用方法如下：

```
"IF A-1 AND B-2 OR C-3 THEN U-8 | V-9"
```

为了方便后续修改，我将关键词以静态常量数组的方式标记出来：

```
static const fc_rule_keyword __fc_rules_keyword_table[] = {
    "IF", "THEN",           // conditional segmentation keywords
    "AND", "OR",            // conditional relationship keywords
    "?",                    // conditional ignore keywords
    "|",                    // multiple output annotations for results
};
```

至此，规则条目的编写规范便已确定，接下来需要设计规则管理结构体了。

```
/**
 * @brief The rule controller
 *
 * @memberof rule_keyword_table
 * @memberof rule_keyword_num
 * @memberof rules rule library
 */
struct fc_rules
{
    const fc_rule_keyword* rule_keyword_table;
    fc_size rule_keyword_num;

    list_head rules;
};
```

使用指针访问关键词组，节省内存空间、方便管理，规则条目则使用链表进行存储，便于随时添加，链表中存放的规则是一个个字符串。

与之相关的规则对象的注册、注销，添加、清空规则等功能函数简介如下：

名称	参数	返回值	
fc_rules_register	struct fc_rules* const	bool	注册一个规则管理对象，注册时会将关键词

名称	参数	返回值	
fc_rules_unregister	struct fc_rules* const	bool	注销一个规则管理对象，因为对象的链表中
fc_rules_add_rule	const struct fc_rules* const,fc_rule_item	bool	向规则管理对象中添加一条规则，添加的规
fc_rules_clear_rule	const struct fc_rules* const	bool	清空规则管理对象中的规则，即清空链表
fc_rules_get_rule_num	const struct fc_rules* const	fc_size	获取规则管理对象中的规则数目
fc_rules_print_rule	const struct fc_rules* const,const char*	bool	打印规则管理对象中的所有规则

现在我能够使用规则管理对象管理我的规则，但是这些规则还是比较难处理的，我想要得到一个仅包含输入及其关系、输出内容的数据，为此我又设计了一个结构体：

```
struct fc_calculation
{
    list_head condition;
    list_head result;
};
```

其中包含两个链表，分别用来表示输入（条件）和输出（结果），为了方便管理及后续扩展，我将这两个链表中存放的数据的结构设计成同一个：

```
struct __fc_calculation_unit
{
    fc_rule_consition_result cr;
    fc_rules_opera_type opera;
};
```

这个结构中包括了输入/输出子集名称和对应的操作符，对于输入，目前有两个操作符，其分别

是 \vee 和 \wedge 用来两者之间取大和取小。

对于这个计算式结构体（`struct fc_calculation`），我为其添加了如下几个操作函数：

名称	参数	返回值	
fc_rules_create_calculation	struct fc_calculation* const	bool	创建一个计算式对象，将会为对象创建两个
fc_rules_export_calculation	struct fc_calculation* const,const struct fc_rules* const,const fc_index	bool	从规则管理库中导出对应索引处的规则的计
fc_rules_delete_calculation	struct fc_calculation* const	bool	删除计算式
fc_rules_print_calculation	const struct fc_calculation* const,const char*	bool	打印出计算式

经过以上叙述，我们知道了规则库的功能是：

- 1. 管理规则库
- 2. 导出规则对应计算式

1.2.3 模糊输出

1.3 算法外围框架

算法外围框架图如下：

算法外围框架.png

1.3.1 输入数据模糊化

1.3.2 输出数据清晰化