# ######################

## ## <yasuhito@gmail.com>

## #

#

## #

#

## #

#

## #

#

# ##### ## ########


1. ######## #### ..... 1
    1.1. ########### ..... 1
    1.2. ############### ..... 2
    1.3. ######## ###### ..... 3
        1.3.1. ##### 1: ######## ..... 3
        1.3.2. ######## ####### ..... 5
        1.3.3. ############### ..... 5
        1.3.4. ##### 2: ########### ..... 6
    1.4. ######## ##### ..... 8
        1.4.1. ############### ..... 8
        1.4.2. ##################### ..... 9
        1.4.3. ##################### ..... 9
        1.4.4. ################## ..... 9
    1.5. ################ ..... 10
    1.6. ### ..... 10
2. ######## ### ..... 11
    2.1. ############ ..... 11
    2.2. ################## ..... 11
        2.2.1. ############### ..... 11
        2.2.2. ######## ..... 12
        2.2.3. ##### ######## ## ### ..... 12
        2.2.4. ################## ..... 13
        2.2.5. ####### ..... 14
        2.2.6. ########## ..... 15
        2.2.7. ############## ..... 16
        2.2.8. ############ ..... 17
    2.3. ########## ..... 18
        2.3.1. ### ..... 18
        2.3.2. #### (####) ..... 18
        2.3.3. ###### (##) ..... 19
        2.3.4. #### ..... 19
        2.3.5. ######## ..... 19
        2.3.6. ######### ..... 21
        2.3.7. ###### ##### ..... 22
        2.3.8. ######### ##### ..... 23
        2.3.9. ########## ##### ..... 26

2.4. ######### ..... 27
2.4.1. ############# # ############# ..... 30
2.4.2. ######## ..... 31
2.5. ### ..... 33
3. #####, #####! ..... 34
3.1. ############## ..... 34
3.2. ####### ..... 35
3.3. ################ ..... 37
3.3.1. ########### ..... 38
3.3.2. ####### ####### ..... 38
3.3.3. #### ############## ..... 38
3.4. #####, #####! ..... 39
3.4.1. ##### ######## ..... 39
3.5. ##### #### ..... 42
3.6. ######## ..... 44
3.6.1. ## ..... 44
3.6.2. ####### ..... 46
3.6.3. ##### ..... 48
3.6.4. ############ ..... 48
3.7. ### ..... 51
3.8. #### ..... 52
4. ######### ..... 53
4.1. ############## ..... 53
4.2. ###### ..... 54
4.3. ####### ..... 54
4.3.1. #########/####### ..... 56
4.4. ######## ..... 57
4.4.1. ############ ..... 58
4.4.2. ######## ..... 59
4.4.3. ############ ..... 60
4.4.4. ################### ..... 60
4.4.5. ############## ..... 62
4.5. ### ..... 62
5. ################ ..... 64
5.1. ############## ..... 64
5.2. ###### ..... 65
5.3. ####### ..... 65
5.4. ######## ..... 66

5.4.1. ######## ..... 66
5.4.2. ######### ..... 67
5.4.3. ######_###### ..... 67
5.4.4. #### ### #### ..... 69
5.5. ########## ..... 74
5.5.1. #### ..... 74
5.6. ######### ..... 77
5.7. ### ..... 79
6. ############### ..... 81
6.1. ################## ..... 81
6.2. ######################### ..... 82
6.3. ####### ..... 83
6.3.1. ########### ..... 84
6.4. ######## ..... 86
6.4.1. ######### ..... 88
6.4.2. ######## ..... 89
6.4.3. ######_######### ..... 90
6.4.4. ##### ..... 90
6.4.5. ###_####_########### ..... 91
6.4.6. ######_####_########### ..... 92
6.4.7. ######_#####, ######_######### ..... 92
6.4.8. ###/#####_##### #### ..... 93
6.5. ### ..... 95
7. ################ ..... 96
7.1. ############# ..... 96
7.2. ############## ..... 97
7.3. ###################(#########)#### ..... 98
7.3.1. ###### ############### ..... 99
7.3.2. ###### ###########(#######) ..... 100
7.3.3. #########(#### ########## ###) ..... 101
7.4. ####### ..... 102
7.5. ######## ..... 104
7.5.1. #######(###### ##)### ..... 105
7.5.2. ###### ### ### ..... 107
7.5.3. ######### ..... 108
7.5.4. ### ### ..... 109
7.5.5. ############# ..... 110
7.6. ### ..... 110

8. ########1.3########## ..... 112
8.1. ########1.0############## ..... 112
8.2. ######### ..... 112
8.2.1. ####### ..... 112
8.2.2. ########1.3 ###### ..... 113
8.2.3. ######### ..... 114
8.3. ########1.3 ## ###### ## ..... 115
8.4. ########1.3############## ..... 115
8.5. ######## ..... 116
8.5.1. ######_##### #### ..... 118
8.5.2. ######_## #### ..... 120
8.6. ### ..... 121
9. ##### ######## ..... 122
9.1. ############# ..... 122
9.2. ######### ..... 123
9.3. ########### ..... 124
9.4. ######### ..... 125
9.5. ############ ..... 125
9.5.1. #####: ################### ..... 126
9.5.2. ####: ####### ..... 129
9.5.3. ####: ########## ..... 130
9.6. ######## ..... 133
9.7. ### ..... 134
9.8. #### ..... 134
10. ###################### ..... 135
10.1. ############# ..... 135
10.2. ############## ..... 135
10.3. ####### ..... 136
10.3.1. ######### ############### ..... 137
10.3.2. ####### ..... 137
10.3.3. ############## ..... 138
10.4. ################ ..... 138
10.4.1. ############ ..... 138
10.4.2. ########## ..... 139
10.4.3. ############# ..... 140
10.5. ######## ..... 140
10.5.1. ###### ..... 141
10.5.2. ####### ..... 142

10.5.3. ######## ..... 143
10.6. ### ..... 143
11. ######## ..... 145
11.1. ########### ..... 145
11.2. ########1918###### ..... 146
11.2.1. ####### ..... 147
11.2.2. ######## ..... 149
11.3. ################### ..... 153
11.3.1. ####### ..... 155
11.3.2. ######## ..... 156
11.4. ### ..... 160
12. ### (##) ..... 161
12.1. ########### ..... 161
12.2. ################# ..... 162
12.3. ###### ..... 162
12.3.1. ############## ..... 162
12.3.2. ################# ..... 164
12.4. ######## ..... 165
12.4.1. ###### ## #### ..... 165
12.4.2. ############## ..... 168
12.4.3. ### ############## ..... 170
12.5. ### ..... 171
13. ### (##) ..... 172
13.1. ########## ..... 172
13.1.1. ######################### ..... 173
13.2. ################## ..... 174
13.2.1. 1#################### ..... 175
13.2.2. #################### ..... 176
13.3. ############ ####### ..... 177
13.3.1. ##############(#) ..... 177
13.3.2. ########## ( RoutingTable ###) ### ..... 178
13.3.3. ##### ..... 179
13.4. ####### ..... 180
13.4.1. #### ######## ..... 182
13.4.2. ##### ######## ..... 183
13.5. ### ..... 184
14. ### (##########) ..... 185
14.1. #################### ..... 185

14.1.1. ####### ############# ########## #### ..... 185
14.1.2. ### ######### #### ..... 186
14.1.3. ####### ##### #### ..... 187
14.1.4. ######### ###### #### ..... 188
14.1.5. ### ##### ###### #### ..... 189
14.1.6. ###### #### ..... 189
14.2. ################# ..... 190
14.2.1. ##### ### ####### ##### ..... 190
14.2.2. ####1 ## ####2 # #### ## ..... 192
14.2.3. ########### ..... 193
14.2.4. ####2 # ### ####### ### ..... 194
14.2.5. ####2 ### ### ##### ### ..... 194
14.3. ####### ..... 196
14.4. ### ..... 197
15. ############### ..... 198
15.1. ############ ..... 198
15.2. ########## ..... 199
15.2.1. ###### ..... 199
15.2.2. ####### ..... 202
15.3. ####### ..... 204
15.4. ################# ..... 207
15.4.1. ############## ..... 208
15.4.2. ######## ######## ..... 210
15.4.3. #### ############ ..... 212
15.4.4. ######### ..... 212
15.5. ### ..... 213
16. ############## ..... 215
16.1. ############ ..... 215
16.1.1. ############# ..... 216
16.2. ######### ..... 218
16.3. ####### ..... 219
16.3.1. ############## ..... 220
16.3.2. ################### ..... 220
16.3.3. ############# ..... 222
16.4. ################# ..... 223
16.4.1. ############# ########## (#######_######.##) ..... 224
16.4.2. ########### ####### (####_#######.##) ..... 225
16.4.3. #### ####### (####.##) ..... 227

16.5. ######## ##### ..... 227
16.5.1. ############# ..... 227
16.5.2. ################### ..... 229
16.6. ### ..... 230
16.6.1. #### ..... 230
17. ############ ..... 231
17.1. ############### ..... 231
17.2. ######### ..... 231
17.3. ###### ..... 232
17.3.1. ################# ..... 232
17.3.2. ####### ..... 233
17.3.3. ######### ..... 234
17.4. #### ### ### ..... 235
17.4.1. #### ### ######## ..... 237
17.4.2. ############# ..... 238
17.4.3. ########## ..... 239
17.5. #### ### ## ..... 239
17.6. ############### ..... 240
17.7. ################### ..... 241
17.7.1. ################## ### ..... 242
17.7.2. ##### ### ..... 242
17.8. ### ..... 243
#. ### ############# ..... 244
#. ########### ..... 245
#.1. ##### #### ..... 245
#.1.1. ##### ### ..... 245
#.1.2. ##### ####_##### ..... 246
#.1.3. ##### ####### ..... 247
#.1.4. ##### #### ..... 248
#.1.5. ##### ##### ..... 248
#.1.6. ##### ######_#### ..... 249
#.1.7. ##### ##### ..... 249
#.2. #### ..... 251
#.2.1. #####(####) ..... 251
#. ######### ### ####### ..... 253

# #### ## #######


1.1. ################################ ..... 4
1.2. ######## ########################################### ..... 5
1.3. ########################### ..... 7
1.4. ##################################### ..... 8
2.1. ############### ######## ######## ..... 11
2.2. ##### ################## ######## ############# ..... 12
2.3. ######## ####### ########### ######## ## ### ..... 13
2.4. ############ ###### ## ################## ..... 14
2.5. ###### ### ################### ..... 14
2.6. #### ### ################ ..... 15
2.7. #### ### # ###### ## ########### ###### ### ## ..... 16
2.8. ####### #######/##### ######################### ..... 17
2.9. ##################################### #### ####### ############# ..... 18
2.10. ########### ### ######### ..... 23
2.11. ### ######## ## ######### ..... 24
2.12. ## ############## ###/### ########## ..... 25
2.13. #### ################## ..... 26
2.14. ################# ..... 27
3.1. ########## ..... 37
3.2. ##### ############## ..... 43
3.3. ######_##### ########## ..... 49
4.1. ############ ..... 54
5.1. #################### ..... 64
6.1. ######################## ..... 82
6.2. ######################## ..... 83
6.3. ###### #####_#####.#### ########### ..... 85
7.1. ##########1#####2################## ..... 97
7.2. ################1#### ..... 98
7.3. #####################(#########)### ..... 99
7.4. ###### ################################ ..... 100
7.5. ########################################### ################## ..... 101
7.6. ######2#################################################1#### ..... 102
8.1. ########1.3####################### ..... 112
8.2. #### ## 0 ##### ######### ####################### ..... 113
8.3. ############ ############### ..... 115
9.1. ### 3 ############### ..... 123

9.2. ######## ####### ..... 124
10.1. ########################## ..... 136
10.2. ###################### ..... 137
10.3. ######################################### ..... 139
10.4. ################################## ..... 139
10.5. ################################### ..... 140
10.6. ######################################### ..... 143
11.1. ########### ..... 145
11.2. ########1918############################## ..... 147
11.3. ########1918 ################## ..... 148
11.4. #######################→######################## ..... 154
12.1. ###################################### ..... 163
12.2. #### ### ########### ### ######## ..... 163
12.3. ###### ### ########### ..... 164
12.4. ################## ..... 165
13.1. ########################## ..... 173
13.2. ############################################## ## ########## ..... 174
13.3. ######################## ..... 175
13.4. ################## ..... 176
13.5. 0.0.0.0/0 ############## ..... 177
13.6. ################ ..... 181
14.1. #################### ..... 185
14.2. ############ ## = 0 # ####### ############ ######## ########## ######### . 186
14.3. ### ######### ############# ..... 187
14.4. ### ######### ############# ..... 188
14.5. ######### ###### ############# ..... 188
14.6. ### ##### ###### ############# ..... 189
14.7. ###### ############# ###1 ###### ..... 189
14.8. ############################ ..... 190
14.9. ####1 ######## 1 ## ### ####### ####### ..... 191
14.10. ####1 # ####2 # #### #### ####### ######## ####2 # ### ############## ..... 193
14.11. ####2 # ### ######## #### #### ####### # ####2 ######### ..... 195
15.1. 2015 # ####### ##### # ####### #########: ####://###.#######.##/2015/ #######/######/########02.### ######### # ####### ##### 2015 ####### ### #### ###### ### #### ### #####, ###. ### ###### ########. ..... 198
15.2. #### ############ ..... 200
15.3. #### ##### ######## ################ ..... 201
15.4. #### 0#2 ######## ###### ## ##### ..... 202

15.5. ############## ..... 203
15.6. #### 0#1 ########## ..... 204
15.7. ########.######### ..... 205
15.8. #### 0#1 #### 1 ############# ..... 206
15.9. ######################### ..... 207
15.10. ########## ..... 208
16.1. ################ ######## ######## 1 ################ ..... 216
16.2. ########################### ..... 217
16.3. ######################## ######## ##### ..... 218
16.4. ################## ..... 219
16.5. ### 4 ###### 6 ########### ..... 220
16.6. ######### ..... 222
16.7. ################ ..... 224
16.8. ########### #### ..... 226
16.9. ################################ ..... 228
16.10. ################################ ..... 229
16.11. ################################### ..... 229
17.1. ############# 1 ################################### ..... 231
17.2. ######################## ..... 232
17.3. ######## ..... 233
17.4. ############# #### ### ## ..... 236
17.5. ############### ..... 240
17.6. #################### ..... 241

# #### ## ######


1.1. # 1#1: ############### ..... 4
1.2. # 1#2: ########################### ..... 5
1.3. # 1#3: ################# ..... 6
1.4. # 1#4: ######################### ..... 7
2.1. ################## ..... 19
2.2. ###########################1 ..... 27
2.3. ###########################2 ..... 28
2.4. ######################### 1 (#####1) ..... 29
2.5. ######################### 2 (#####2) ..... 30
2.6. ############# ############ 1 (#####1) ..... 30
2.7. ############# ############ 2 (#####2) ..... 31
2.8. ################# 1 (#####1) ..... 32
2.9. ################# 2 (#####2) ..... 32
5.1. ######## ######## (##) ..... 68
5.2. ########### #####.### ###### ..... 70
5.3. ########## ..... 72
5.4. ####_####_###_############## ..... 73
8.1. ######## 1.3 ########### (##############) ..... 113
8.2. ######## 1.3 ########### (#######) ..... 114
8.3. ######## 1.3 ############### ..... 115
17.1. # 17#1: #### ### ## ..... 239

# ####### 1. ######## ####

####### ######## ############################################################
#####

## 1.1. ###########

## (########): ##################################################
##############################################################
#################################################

*# ##### #### ######## Perl#(####)*

################## 1 ##################################################################!#################################################

################################## 1 ########################################################### 3 ##########################################

########

############ ### # ## ############################## #### ###########[1]#### ################################

##########

#################################################################### ############## #################[2]#################################################################

############

### (####### ### #######) 2324 ############################################################ #### #############[3]######### ### ################### ###############

#################################################################################################################

#################################################################################################################

##################################16 ###################17 # ########################

## 1.2. ###############

#################### 1 ## ######## #################### ##################### ######### 1 ############ ######## 1 ########################################### ######################## ######## ####### ########## (#################### ### ###) ############ # ### ########################

######## ##################################################? ############ #####!#################################################################### #################

[1] ### # xpizza ##########: #####://#####.###.###/###/####/#######/###/#####/#######/#######

[2] ####################: ####://###.##.###.###/#####/

[3] ### 2324: #####://###.####.###/###/###2324.###

######## ##########################

- ########################################
- ########################################
- ########################################

#######################################################################
######### ######################?#########################################
###################

############################################ 1 ##############################
########################### ######## ##################################

############### ###########################

## 1.3. ######## ######

######## ###################################################################
################################################################ #########
###?

## ######## ############################################################ #
95% ############

#################### (#####) ################################### 3 ##########
####

### 1.3.1. ##### 1: ########

######################

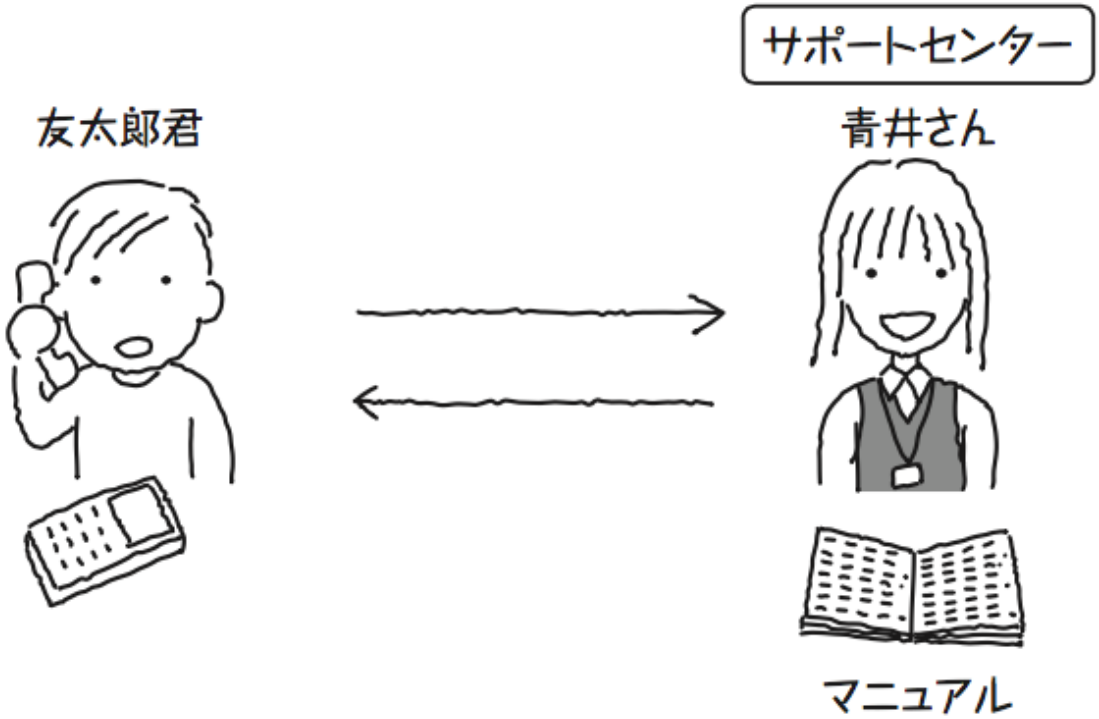
#######################################################################
#################

################################

#####################################################

################################################### 2 ### (#1#1)#

1. #################
2. ##############################




## ###### 1.1. ##################################

##########

#################################################

#################### (# 1#1)########## 3 ##################################### ####################################

### ##### 1.1. # 1#1: ################

| ####### | #### | ####### |
|---|---|---|
| ####### | ################ | 8 # |
| ######### | ################ | 6 # |
| ###### | ################ | 4 # |
| ###### | ##### | 2 # |

##########################################

########################################

################################ 8 ### 9 ############ (# 1#2)#

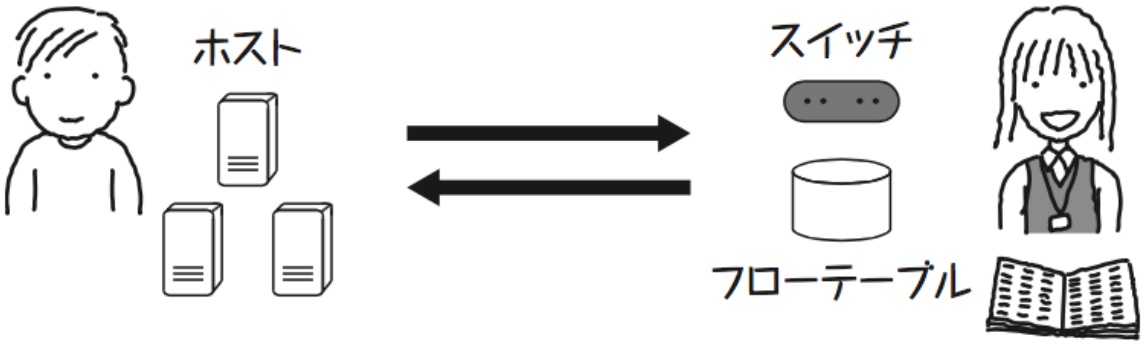
##### 1.2. # 1#2: ##########################

| ####### | #### | ####### |
|---|---|---|
| ####### | ############### | 9 # |
| ######## | ############### | 6 # |
| ###### | ############### | 4 # |
| ###### | ##### | 2 # |

#######################################################################
#################################################################

## 1.3.2. ######## #######

######## ################################### ######## ################### ### (# 1#2)#################### ########################################
######################################




###### 1.2. ######## ##########################################

########  ################################################################
######## ################################################################
#######################################################################
###

## 1.3.3. ###############

#######################################################################
#################################################################

[4] ##################################################2######### ############

###################### 1#3 ################################################
############# 3 ##########[4]#

### ##### 1.3. # 1#3: ##################

| ######## | ##### | #### |
|---|---|---|
| ### ## #### = 192.168.1.0 | ### 8 #### | 80 #### |
| #### ## = 10 | ### 10 #### | 64 #### |
| ### ### #### = 00:50:56:#0:00:08 | #### ## = 2 ####### 8 #### | 24 #### |
| ### ## #### = 203.0.113.0/16 | ####### | 10 #### |

########

#### ##### ## #### = 192.168.1.0##########

#####

#### ######## 8 ##############

####

#### ############################################ 9 ############################
############# 80 ##############

######## ######## ###################

## 1.3.4. ##### 2: ############

#################1 ##############################################

#########################

#### ##### ## #### = 192.168.1.0##########

#### ######## 8 ##############

#### ############################################ 9 ############################
############# 80 ##############

######## ######## ###################

## 1.3.4. ##### 2: ############

#################1 ##############################################

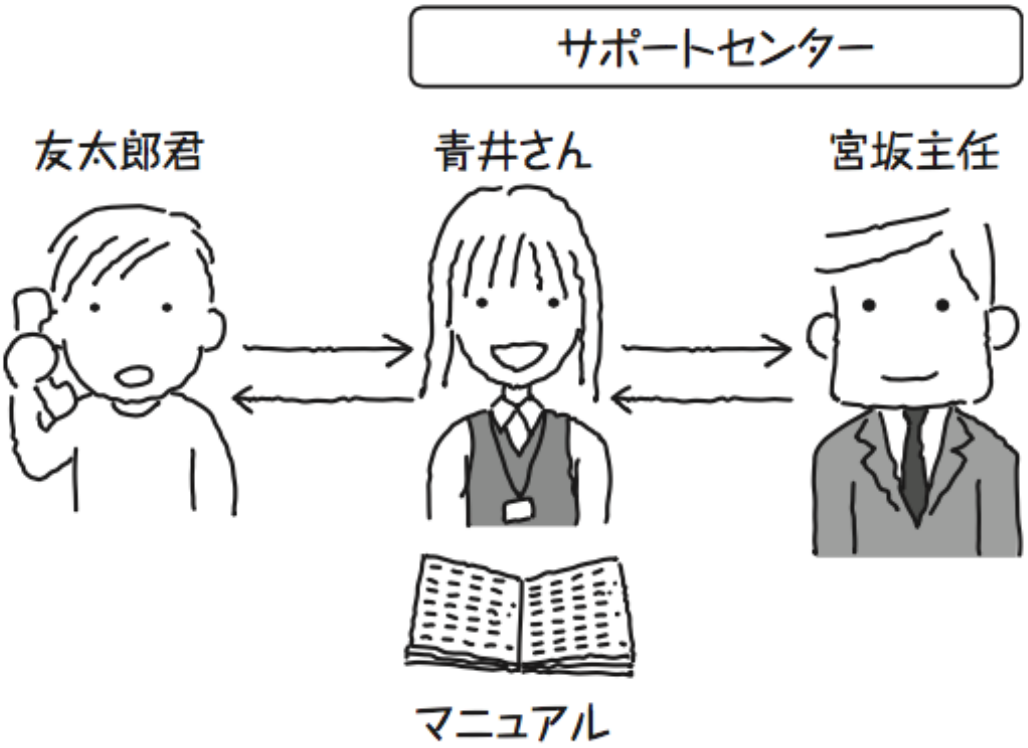
#########################

#### ##### ## #### = 192.168.1.0##########

#### ######## 8 ##############

#### ############################################ 9 ############################
############# 80 ##############

######## ######## ###################




## ###### 1.3. ##############################

############################ (#1#3)#

##################################################

###################

############################

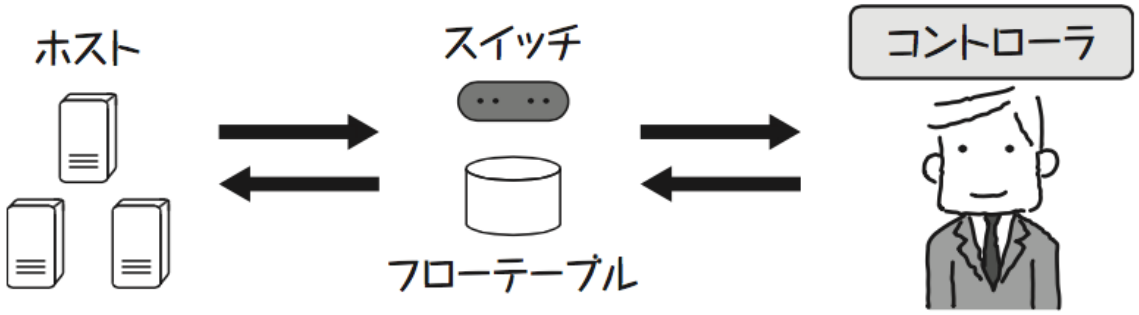
################################

#### ##### ##### ##

| ####### | #### | ####### |
|---|---|---|
| ######## | ############### | 1 # |

### ######## #######

######## ################################ (# 1#4)################################
################################################################################
########################




### ###### 1.4. ########################################

################################################################################
########################################

######## ################################################################################
################################################################################
#######################

## 1.4. ######## #####

######## ###################### #################

### 1.4.1. ################

################################################################################
#############################################################

########  ################################################################
#### # ########### ################################################################
#############################################################

################### #### ### ########17 ###################
########################################18 ########## #######
###############

### 1.4.2. ######################

################################################################################################################################

######## ################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################

################4 ##################################15 ##########################################16 ######################

### 1.4.3. #######################

#################################################################

#################################################################################################################################

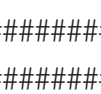
##### ##### # #### ########################

####################################9 ####### ##############

### 1.4.4. ################

############ ######## ################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################

################################ ################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################



> ############# ######## ########6 ###################7 ######
> ##############8 ##########1.3 ############11 ############12 #
> #### (##)##13 ##### (##)##14 ##### (##########)############

> ##############
>
> ##########################################################
> ####100 ################### 10 ###########100 ################
> ##########################################################
> ####################################
>
> ######## ##################################################
> ####################

## 1.5. ##################

############  ##############################################################
##########################################################################
#######

############ ######################################### ######## #############
##########################################################################
##########################################################################
##################################

## 1.6. ###

#### ### ########## ######## ################ ################################
#####################################################################

- #################
- #############
- ################
- #############

#### ######## #################

# ####### 2. ######## ###

######## ################################## ######## ##### 1.3 ############## #######

## 2.1. ############

###################### 2 ####

1. ####################
2. #######################

###### 2 ############################################################ 1.3 ######## 1.3 ############## 1.0 ########################### 1.3 ###### 1.0 ######## #####

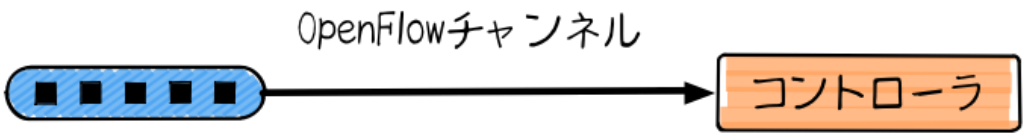
## ######## ################################################################

## 2.2. ##################

######## ##################### ############################################ ##################### 1 ######### ##########################################

### 2.2.1. ###############

############### ### ############ ######## ############# ### ################## ################################## 2#1 ################################

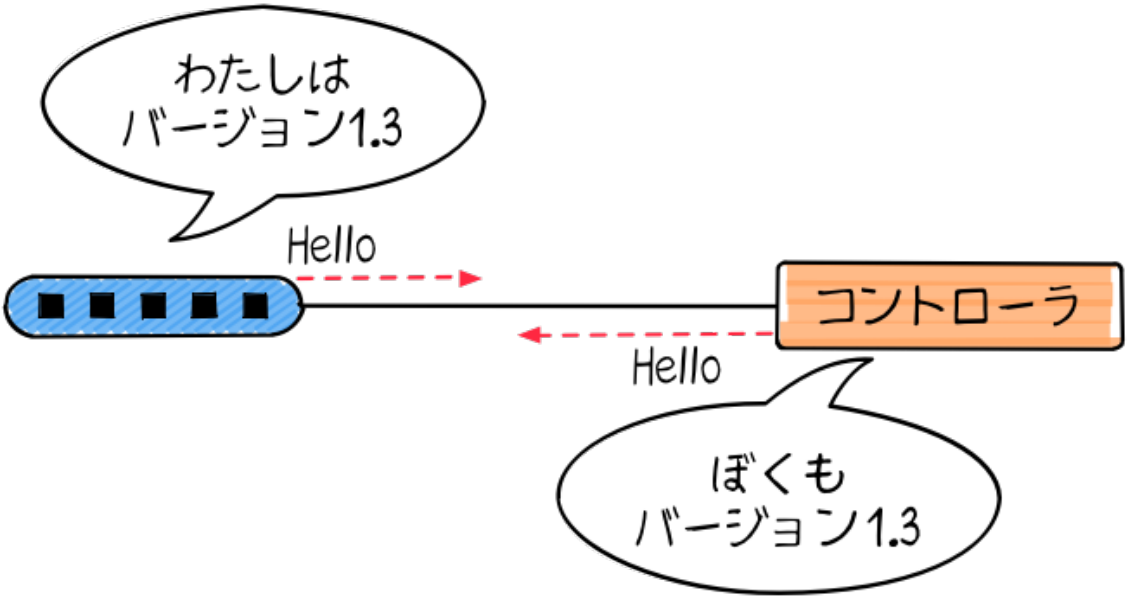



#### 2.1. ############### ######## ########

## ######## ########## ### ############### ### (######### ##### ########) ################## ### ##################### ################################ ####################

## 2.2.2. ########

################ ####### ################################################ ######################################## ##### ################ (# 2#2)#

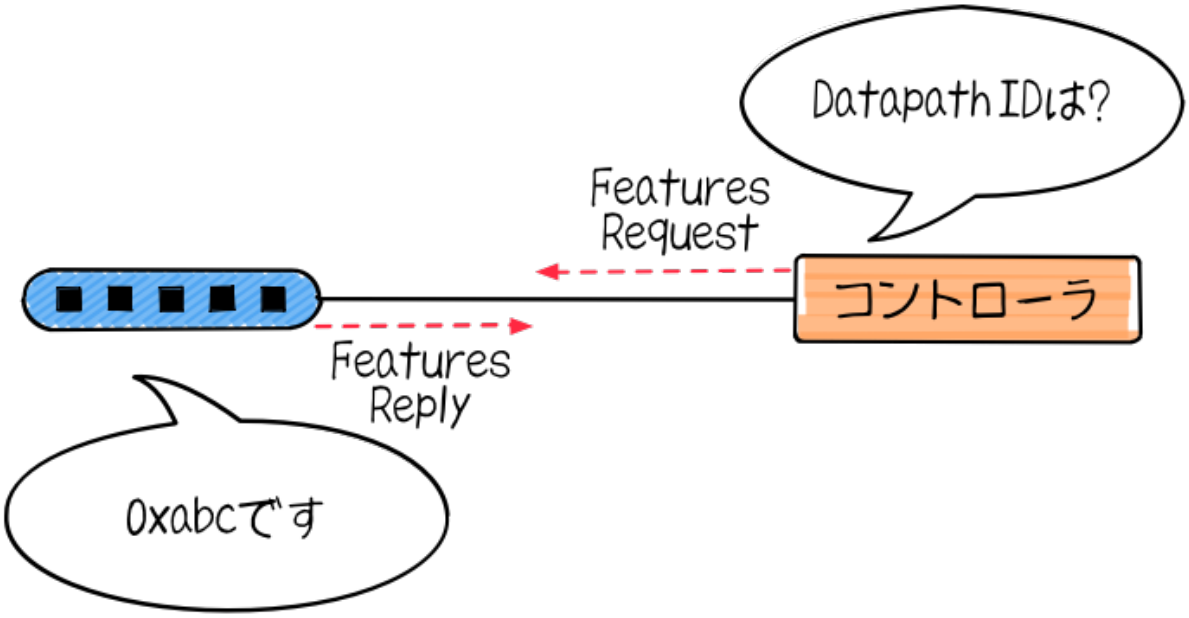



###### 2.2. ##### ################## ######## #############

################################################## ########################

## 2.2.3. ##### ######## ## ###

################## ######## ## ################### ######## ####### ########## ##### ######## ## ######### ######## ##### ############


Datapath IDは?
Features Request
コントローラ
Features Reply
0xabcです

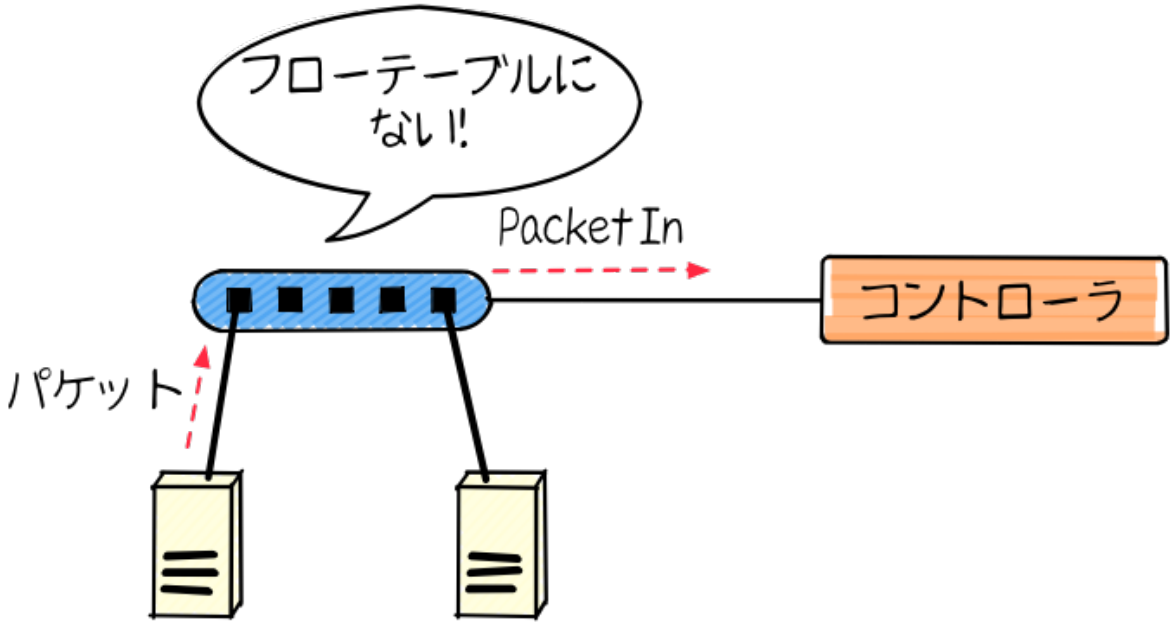
###### 2.3. ######## ####### ########### ######## ## ###

######## ##### ####### ######## ## #######################

- ################
- ############
- ###########

## 2.2.4. ##################

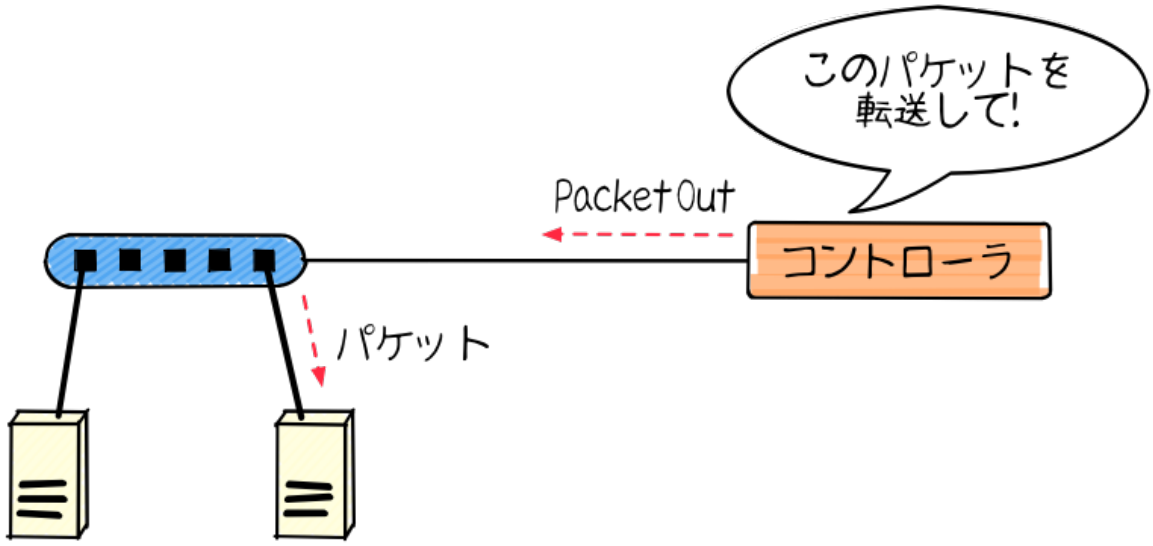
#################### ###### ## ############################################ ############ ## ############################ (# 2#4)#


フローテーブルに
ない!
Packet In
コントローラ
パケット

###### 2.4. ############ ###### ## ##################

## 2.2.5. #######

###### ### ###### ###### ## ################################ (# 2#5)#

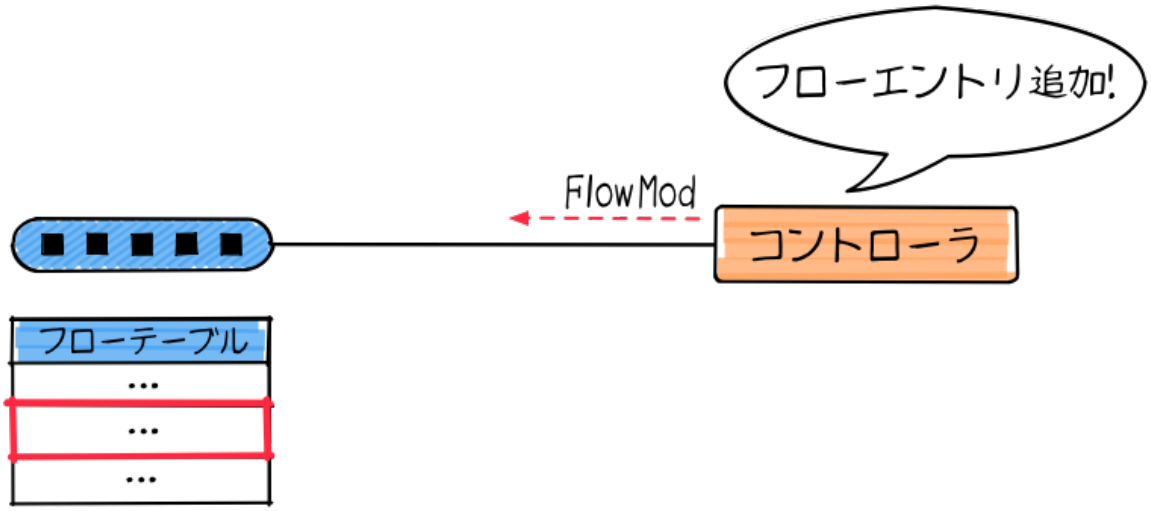

このパケットを
転送して!
Packet Out
コントローラ
パケット

###### 2.5. ###### ### ###################

###### ### ############### ## ############################## ###### ## ### ###### ### ##################################

## 2.2.6. ##########

#### ### ######################################## (# 2#6)##### ### ############## ##############################

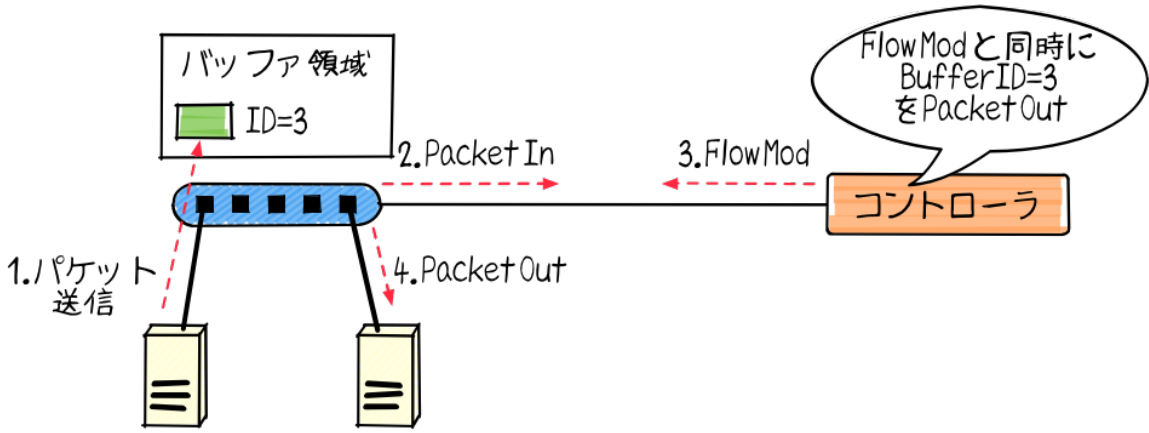



###### 2.6. #### ### ################

######## ################################################ #### ### ########## ################################################

###: #### ########## ###########

```
## ######## ########## #### ### ######### ###### ### ##########
################################

## #### ### & ###### ### ## 2#7 ############### ###### ## ##
################ ###### ## ################################
###### ## ################ ## (###### ## ###) ################
# #### ### ###### ###### ## ################################
#### ###### ### #######
```


バッファ領域
ID=3
2.Packet In
3.FlowMod
FlowModと同時に
BufferID=3
をPacket Out
コントローラ
1.パケット
送信
4.Packet Out

###### 2.7. #### ### # ###### ## ########### ###### ### ##

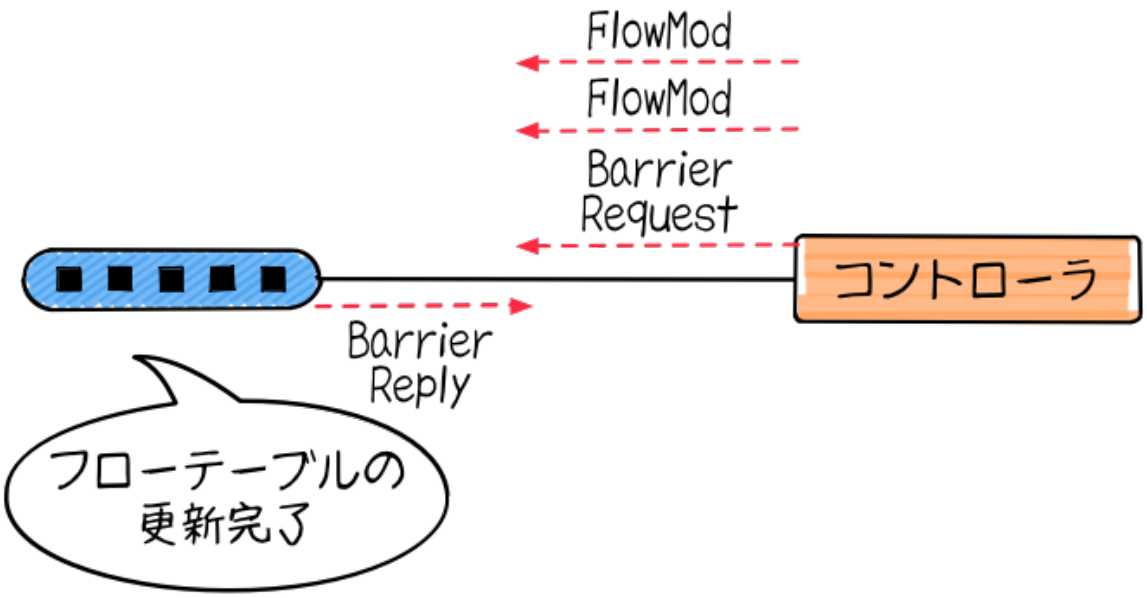
################### 3 #########

- ############################################ ###### ## # ################################
- ################################ ### ##################
- ###########################

######### ###### ### # #### ### ################

## 2.2.7. ##############

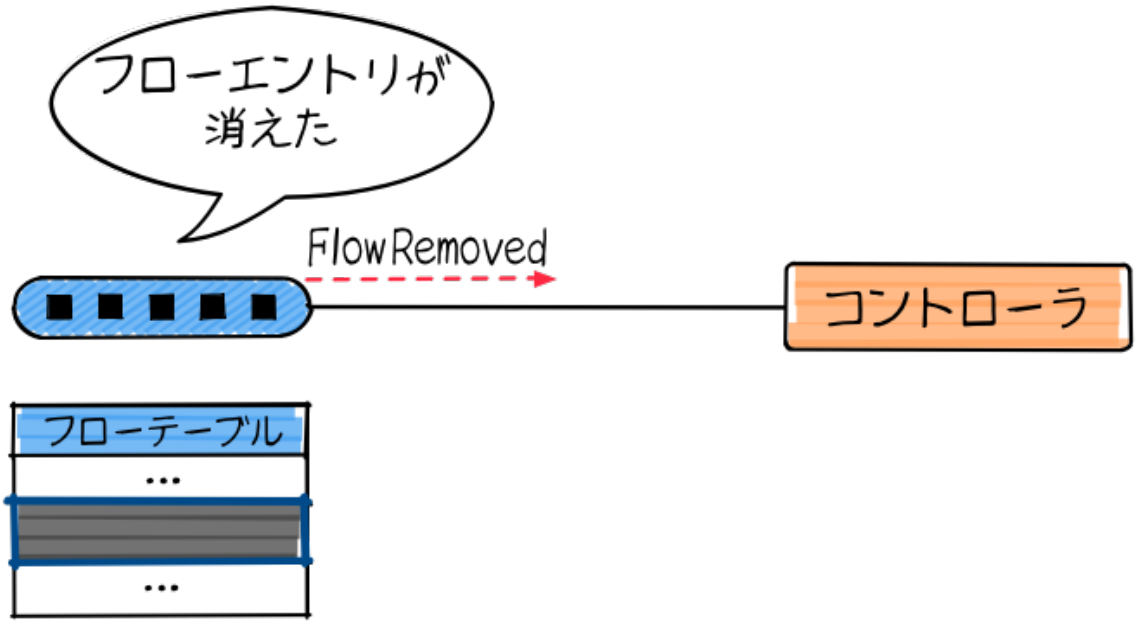
#### ### ########################### ####### ########## (# 2#8)######## ####### ####### ################## #### ### ###################### ####### ##### ###### #####


FlowMod
FlowMod
Barrier
Request
コントローラ
Barrier
Reply
フローテーブルの
更新完了

###### 2.8. ####### #######/##### ########################

### 2.2.8. ############

############################ #### ####### ######################### ####### ################################################################ ########################




###### 2.9. ######################################## #### ####### ## ###########

## 2.3. ###########

#1#################### 6 #########

- ###
- #### (####)
- ###### (##)
- ####
- ########
- #########

### 2.3.1. ###

############# (0 # 65535) ##################################################################################

### 2.3.2. #### (####)

######## 1.3 ####################################

- #######

- ######
- ################### (#)
- ################### (###)

### 2.3.3. ###### (##)

############### (##) ################# 2 ########

- ##########: ############################################################ 0 ### #######
- #########: ####################################################

########### 0 ##########################################

### 2.3.4. ####

#################################################################################################################################### ## ##################

### 2.3.5. ########

###################  ################################################################################################################################################################################################

######## 1.3 ###40 ################ #2#1 #################### ###/### ###########

### ###########

> ######## ############################################## 12 # ##############  ##################################  ######## ## ################################################################################################################

> ############ ##### 1.3 ######## ########## ################################### ########## ##############

##### 2.1. ###################

| | |
|---|---|
| ## | ## |
| ## #### | ############ |

| | |
|---|---|
| ## | ## |
| ## ### #### | ############ |
| ##### ### | ### ### #### |
| ##### ### | ## ### #### |
| ##### #### | ######### |
| #### ## | #### ## |
| #### ######## | #### ### ## (###) |
| ## #### | ######## ####### |
| ## ### | ## ### ### |
| ## ### | ### ## #### |
| ## ### | ## ## #### |
| ## ##### | ## ######## |
| ### ### #### | ### ######### |
| ### ### #### | ### ######## |
| ### ### #### | ### ######### |
| ### ### #### | ### ######## |
| #####4 #### | #### ## |
| #####4 #### | #### ### |
| ###6 ### | ### ###6 #### |
| ###6 ### | ## ###6 #### |
| ###6 ######### | ###6 ###### |
| #####6 #### | #####6 ## |
| #####6 #### | #####6 ### |
| #### ##### | #### ### |
| #### ## | #### ######### |
| ### #### | ### #### |

######## ##################################################

- ########## 1 ######### ### 80 # (= ####) ###########
- ### ##### 02:27:#4:##:#3:5# #### ## ##### 192.168.0.0/24 #####

###########

### ##############

> ##############################
>
> ######### ################################ #########(###### 2####### 3################# ### ############################ #############)############
>
> ############# #################### ######################### ############# ##### ################ ### #################### ################################ 3 ########…############ (### ##) ########################### ############################ ###################
>
> ############################################################ ################################## ## #### ### #######4 ###### ##############
>
> ############ ################################

## 2.3.6. #########

############################################################ 1.3 ############## ###########

- #############: #################
- #############: ##########################
- #############: ##########################
- ##############: #######################
- ##########: #################

###### #############, #############, ##############, ########## ############### ##################################################

############# ######################################## ## ########### ######### ############################################################ 1.3 ### ## 7 ##############

- ######: ################
- #####: ############################
- ####: ########

- #########: ########################### #
- ########/#######: ####### ####/#### #####/#####
- #########: #################
- ##########: ### #############

################################################################################
###########

[Set-Field, Output]

################################################################### ##### ##### ############# ##########################################

################################################################################
################################################################################
##### ######### ##################################

# ########################
[Output, Set-Field]

###################

[Set-Field A, Set-Field B, Output A, Output B]

########### # # # ########## # # # ##########################################
################################[1]#

#### ############## #### ########################################## ###### ##
################################################## #### ################

############### ###### ###### ######### ###########################

## 2.3.7. ###### #####

###### ##############################################################################
#######

- #####: ###################
- ##_####: #################

[1] ############## ####### ########################################

- ###: ##########################
- #####: ###########################
- ##########: ######################### ## #####
- ######: #####################
- #####: ##################################################################
  ####

##### ##### # ###### # ######## ####################################

## 2.3.8. ######### #####

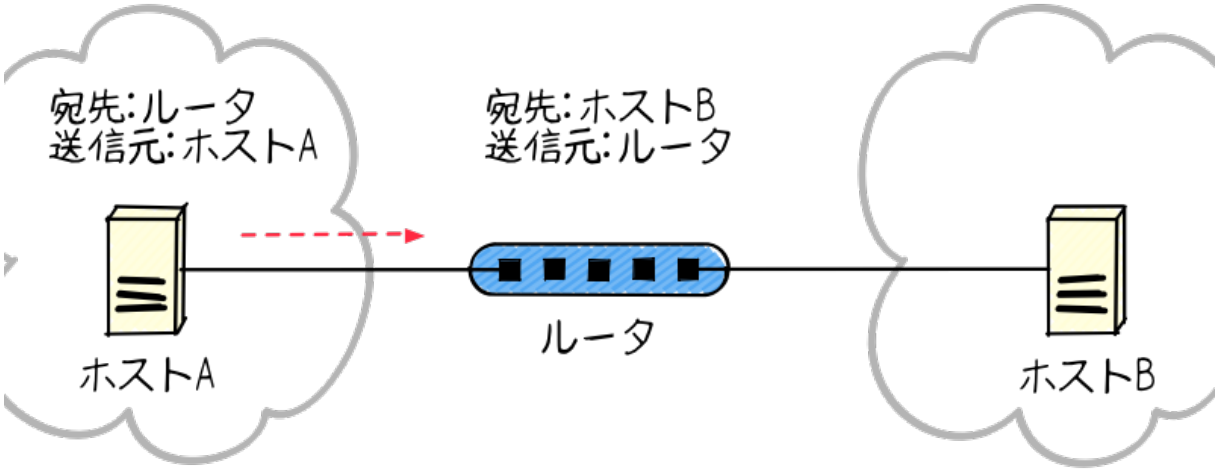
######### ################################################################
####### (#2#1)####################

- ###/## ### #########
- ###/## ## #########
- ### ##########
- ###/### ###/##########
- #### ##/############

#### ######### #########################

### #########

### ############################ ################## ### ####################

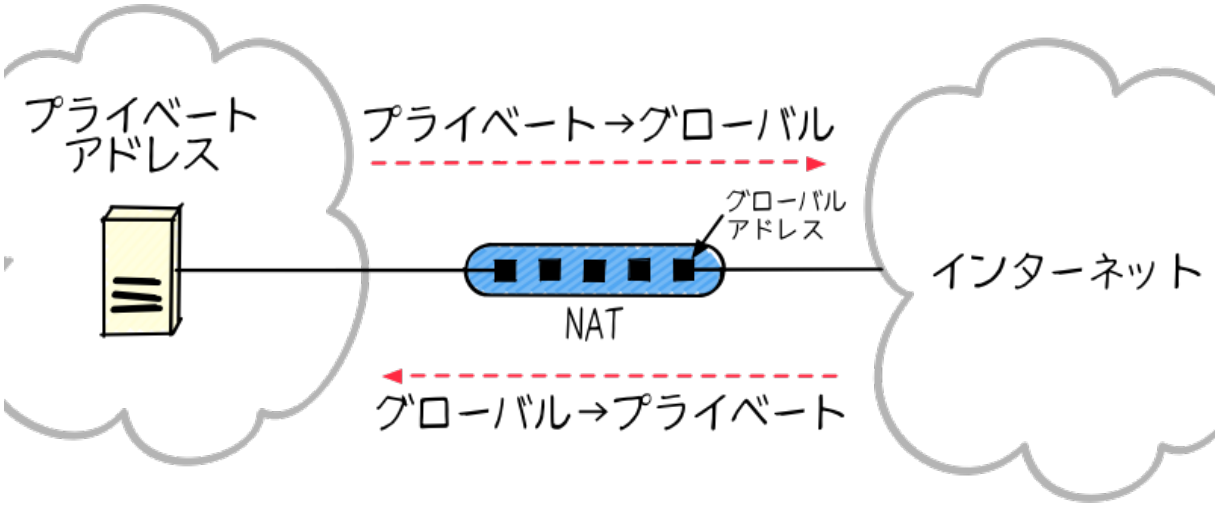



###### 2.10. ########### ### #########

#### 2 ############################################ # ################# # #### ######################### ## ###################################### ### #### ########### ### ############# ### ####################

## #########

## ############### ### (####### ####### ##########) ########### # ### ########## #### ## ####################


プライベート
アドレス
プライベート→グローバル
グローバル
アドレス
インターネット
NAT
グローバル→プライベート

###### 2.11. ### ######## ## #########

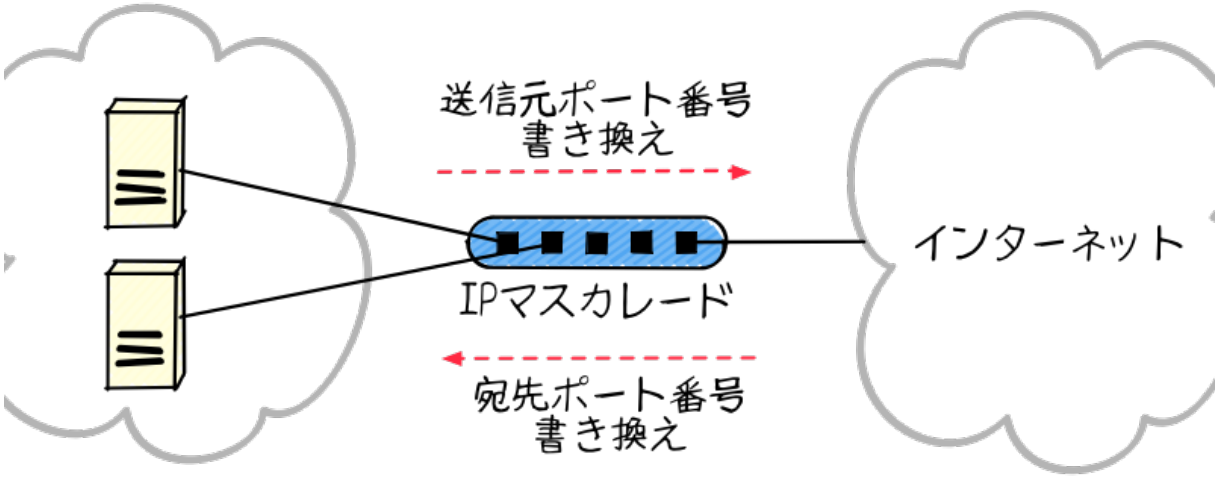
#########################/######################## ## ######################### ################################################################ ## ##### ######### ## ################################################################ ####

### ###########

### ############### (###) ############################################ ########## ### ### ####################

### /### ###########

### /### ################ ## ################# # ## ##################### ### /### ####################

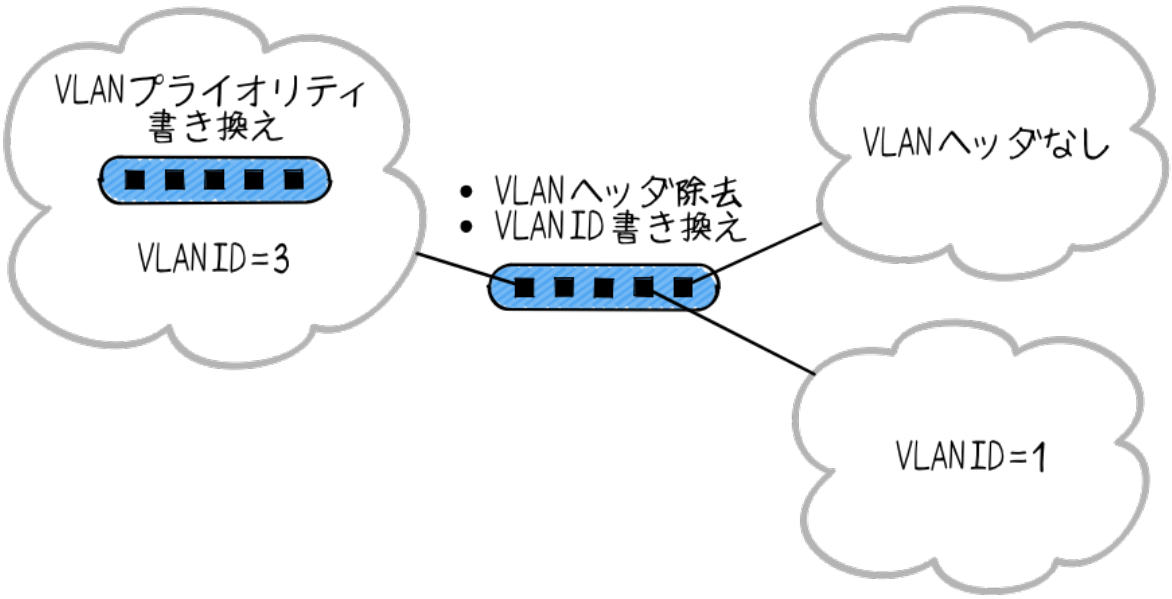



## ###### 2.12. ## ############## ###/### ##########

############ 1 ################################## #### ###/### ############## ############ ################################################################ ###

### #### ########

####### #### ########### ######## ################################ ######### ######### ############################### (####################) ############################### #### ############# #### ############# #### ## ## ########## #### ##### #### ## ############### ################## 2 ### #### #### #######


VLANプライオリティ
書き換え
VLAN ID=3
• VLANヘッダ除去
• VLAN ID書き換え
VLANヘッダなし
VLAN ID=1

### ###### 2.13. #### ##################

#### ## #####

#### ######## #### # ## ############ #### ## # 3 ##############################
############### #### #### ## ### #### ################

#### ############

#### ######################################### (###########) #############
######### 0 (##) ## 7 (##) #####

## 2.3.9. ########## #####

########## ############# ### (############) ##################### #############
##################################################### ### ###############
################### ### ### 0 ##############################################
################## ############# ### ###########

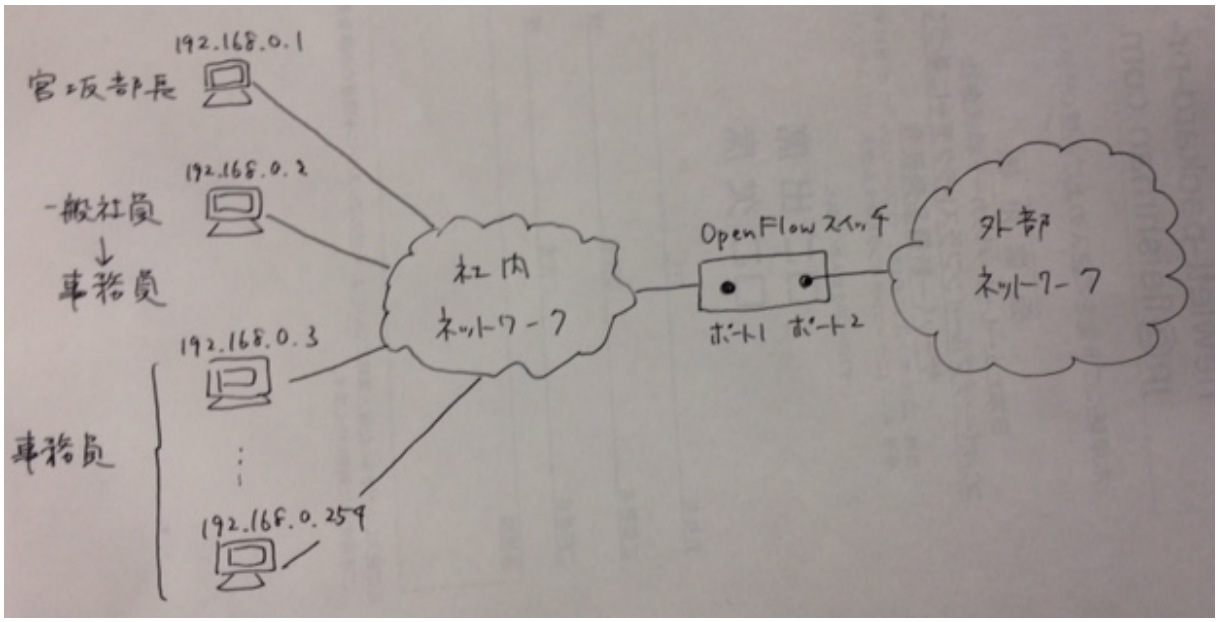
- #### #### ### ######## (### #### ###)
- ## #### ### ######## (### ## ###)
- #### #### ### ####### (######### #### ###)
- ## #### ### ####### (######### ## ###)
- ###### ### ######### ### ########## (#### ### ########)
- ###### ### ######### ### ########## (#### ### #######)

####### ## ####### #### ############ ### ######## ##### #### ### ## #### #### ### # ################### ### ####### ####### #### ### ## ## #### ### #############

## 2.4. #########

######## ##### 1.3 ########### ############################################################################################

################################(# 2#14)#




### ###### 2.14. #################

- #### (192.168.0.1) ################################### 2 #######
- ####### (192.168.0.2 # 192.168.0.254) ################### 2 #######

#### #################### # ########### #### ### 25 # 110 #################### ### ###### # ########### #### ## 80 # 443 #######

#################2#2 ########### 5 ########## (192.168.0.1) ####################

### ##### 2.2. ##########################1

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 25 | ############# (###### 2) | 10000 | ##### |

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 110 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 80 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 443 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32 | ############# (####) | 5000 | ##### |
| ###_## = 192.168.0.0/24 | ############# (###### 2) | 1000 | |

################################################################## (192.168.0.2) ######################################## #2#3 #################

## ##### 2.3. ##########################2

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 25 | ############# (###### 2) | 10000 | ##### |
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 110 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 80 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32, ###_#### = 443 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.1/32 | ############# (####) | 5000 | |

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_## = 192.168.0.2/32, ###_#### = 25 | ############# (###### 2) | 10000 | #### |
| ###_## = 192.168.0.2/32, ###_#### = 110 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.2/32, ###_#### = 80 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.2/32, ###_#### = 443 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_## = 192.168.0.2/32 | ############# (####) | 5000 | |
| ###_## = 192.168.0.0/24 | ############# (###### 2) | 1000 | ##### |
| ######## | ############# (####) | 0 | |

#2#2 # #2#3 ############### 5 ##################################### 5 ######## ###########

################################################### #####1 #### #2#4 ###### ########################### ############################################## ###### ##### 2 ###### ########## ###################

## ##### 2.4. ######################### 1 (#####1)

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_## = 192.168.0.1/32 | ########## 2 | 10000 | ##### |
| ###_## = 192.168.0.2/32 | ########## 2 | 10000 | #### |
| ###_## = 192.168.0.0/24 | ############# (###### 2) | 1000 | ##### |

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ######## | ############# (####) | 0 | |

#####2 #####2#5 ################################################################ ####, ### ##################################

## ##### 2.5. ######################### 2 (#####2)

| ### | ######### | ### | ## |
|---|---|---|---|
| ###_#### = 25 | ############# (###### 2) | 10000 | ######### |
| ###_#### = 110 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_#### = 80 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ###_#### = 443 | ############# (###### 2) | 10000 | |
| ######## | ############# (####) | 5000 | |

#################2#3 ##################################################1 ### ################

### 2.4.1. ############## # ##############

############# ################################################## ########### ################################################################

####2#6 # 2#7 ################################ 25 ################### #####1 # 1 ################################## ################# ######### # ########### ##############1 #################### ######################## #####2 ######### ####### #####2 # 1 ############################### ###### 2 ################################################ # ### ###### 2 ############################

## ##### 2.6. ############# ############ 1 (#####1)

| ### | ######### | ### |
|---|---|---|
| ###_#### = 25 | ############# (######### #), ########## 2 | 10000 |

| ### | ######### | ### |
|---|---|---|
| ###_#### = 110 | ############# (######### #), ########## 2 | 10000 |

## ##### 2.7. ############# ############ 2 (#####2)

| ### | ######### | ### |
|---|---|---|
| ######## | ############# (###### 2) | 10000 |

#####################################################################

1. #### ### ####### : ###### ### ####### ### ##################
2. ### : ########################
3. ######### : #### ### ######################
4. ######## : ### ### ######################
5. ######### : #### ### ######################
6. #### ### ######## : ###### ### ####### ### ##################
7. ######### ### : ### # 1 ###############
8. ### : ######### ############
9. ### : ######### ############
10. ##### : ##### ############
11. ###### : ##### ################# ############

#2#6 # #2#7 ############### ############# ######### ################ ###### #### #########

#### ### ### 

####### ## ##### 192.168.1.101, 102 ########### 25, 110 ########## 2 ########## ## ##### 192.168.1.103, 104 ######### 80, 443 ########## 2 ########################## #2#8 # #2#9 ###

#2#8 ###### ## ##############################2#9 ################################################################################

## ##### 2.8. ################## 1 (#####1)

| ### | ######### | ### |
|---|---|---|
| ###_## = 192.168.1.101 | ############## 1, ##### ##### 2 | 10000 |
| ###_## = 192.168.1.102 | ############## 1, ##### ##### 2 | 10000 |
| ###_## = 192.168.1.103 | ############## 2, ##### ##### 2 | 10000 |
| ###_## = 192.168.1.104 | ############## 2, ##### ##### 2 | 10000 |

## ##### 2.9. ################## 2 (#####2)

| ### | ######### | ### |
|---|---|---|
| ######## = 1, ###_#### = 25 | ############## (###### 2) | 10000 |
| ######## = 1, ###_#### = 110 | ############## (###### 2) | 10000 |
| ######## = 2, ###_#### = 80 | ############## (###### 2) | 10000 |
| ######## = 2, ###_#### = 443 | ############## (###### 2) | 10000 |

###### 64### ########### ### 0 ################## ########################################################################

######################## 64### ######## 8### ################### 11111111 ## ################################## 00001010##### 00001111 ################ 4### # 1 ########## 4### ############################## 11111010 ######

#################################################################

## 2.5. ###

######## ############################################## ######## ########### ################### ######## ############################### ##### (###) ##### #####

# ####### 3. #####, #####!

#####(###)##################################################!

## 3.1. ##############

#################################################################
#############################################################?################
#########

#######################################################################
#########################################################################
######

##### ##### (##)
    ######## # ##### #####

######### (#4#)
    ############

########### (#5#)

    ######## ##############

###### (#6#)

    ############################

######### (#7#)

    ########################

######### ########1.3 (#8#)

    ########## ########1.3 #####

####### (#9#)

    ##############

#### (#10#)

    ################################

######## (#11#)

    ###########

### (#12#,#13#,#14#)

    #######3#### (###)

#### (#15#)

    ####################

########## (#16#)

    ####################2####

########## (#17#)

    ########################

######## (#18#)

    ##############

##############################################

## 3.2. #######

#################################################################2###########
#######################################################

##########################

###########

    #####://#####.######.###/#####/

################

    #####://######.###/#####/

########

####://######.######.###/#####/#########/

###########

#####://#######.###/#####_####

############ ## #####[1]#################################################################
########

#############90#################################################################
#####################################

###2000############################## # ######################## # ############
#######################################################################
#######################################################1##################
####################

#################################################################2011####
#################################################################### ####
#######################################################################
##################################

#######################################################################
##1####################################################################
#######################################################################
##################

#####################################################################

#########?

> ################################(####://###.############.###/
> #############/)##############################################
> ################################
>
> ##########################################################
> ##############################################
>
> ##########################################################
> ####################################################

[1] ### ####################://###########.###/

###### 3.1. ##########

#######################3#####################.....##########
##################! ########################################
##########

## 3.3. ################

#####################################################

- ###### #####
- ###### ###/#####
- ###### 6 #, 7 #

##################4####

#### ##### # #### ######################### sudo ######## #### ################ ###### ####################

#### ##### ##### #### ###### 2.0 ############# ############### #### ######

[2] #####://#######.##/

####### [2]

#### ################### ####################################

#### ####### [3]

######## ######################### ##################

### 3.3.1. ###########

########################################

#### ######/##################

############# ### ############################

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install ruby2.0 ruby2.0-dev build-essential
```

## ############### ###### ##### ######################### ### ###############

#### ###### ###########

############# ### ############################

```
$ sudo yum update
$ sudo yum install ruby ruby-devel gcc gcc-c++
```

## ### # #####++ ###### ##### ########################

### 3.3.2. ####### #######

####### ###################

```
$ gem install bundler
```

## `gem` # #### ########## .### ######################### ####### # .### ##########
###############

### 3.3.3. #### ##############

#### ##########################################

[3] ####://###########.###/

### ######/###### ###########

#### ######## apt-get ###################

```
$ sudo apt-get install openvswitch-switch
```

### ###### ###########

yum ######### #####################(### ############ ## #########)[4]##########
##########################################

```
$ sudo yum update
$ sudo yum install https://rdoproject.org/repos/rdo-release.rpm
$ sudo yum install openvswitch
$ sudo systemctl start openvswitch.service
```

########################################, ###################

## 3.4. #####, #####!

##### #####!############################################ Hello, 0xabc! ( 0xabc # ######### ##) ################################################################
#####

### 3.4.1. ##### ########

################################################ #####!########## hello_trema/ ############### hello_trema/lib/ # mkdir -p ################

```
$ mkdir -p hello_trema/lib
$ cd hello_trema
```

### ################

#################################################################.###########
#######################################################

[4] #####://###.##########.###/####_####

########################## # `trema/hello_trema` ##### (#####://######.###/#####/#####_#####) ##################### #### ##################################

`README.md`
: ##########

`LICENSE`
: ##########

`CHANGELOG.md`
: ####

`Gemfile`
: #################

`Rakefile`
: ######

`lib/`
: #########

`features/`
: #######

`spec/`
: #######

`tasks/`
: ########

> ############## `features/` ############# 9 ####### ##############
> #####

## ###########

##### `hello_trema` ######## `lib/hello_trema.rb` ###### #### ############# `.rb` # #### # ################## ################################################

### ###/#####_#####.##

```
# Hello World!
class HelloTrema < Trema::Controller
  def start(_args)
    logger.info 'Trema started.'
  end
```

```
  def switch_ready(datapath_id)
    logger.info "Hello #{datapath_id.to_hex}!"
  end
end
```

## #######

##### #####! ##### ######## ##### 1 ################## #### ####### # ##### ##### ############################ `trema.conf` ###### `hello_trema/` ##################

### #####.####

```
vswitch { datapath_id 0xabc }
```

################################### ####### ##################

##########1#################### `vswitch` ######1####################( `{ }` )#### #### `datapath_id` ( `0xabc` ) ################16#######

## ######### ## ################################################################ #64#################################################################### ###############

> ######## #########
>
> ############## = ########################################## ################################################################ #################
>
> - ######## = #####
> - ####### = ######
>
> #############
>
> ################################################################ ###########################

## ##### #######

##### ##### ######### ##### ############ #### ################ ### # `hello_trema/` ######### `Gemfile` ######################## ##### ######## ##### ###############

### #######

```
source 'https://rubygems.org/' ❶

gem 'trema'❷
```

❶ ### ########### #####://########.### #####
❷ ##### ##### #####

####### ################## ####### ###### hello_trema ########### bundle install --binstubs ########### Gemfile ##### ##### # ##### ##### .gem ################ ####### ####### trema # bin/ #############

```
$ bundle install --binstubs
$ ./bin/trema --version
trema version 0.9.0
```

#################################################################

## #######(##### ###)

########### trema run ################################################################################

```
$ ./bin/trema run ./lib/hello_trema.rb -c trema.conf
Trema started.
Hello, 0xabc! ❶
$
```

❶ ###:[####+#] ##########

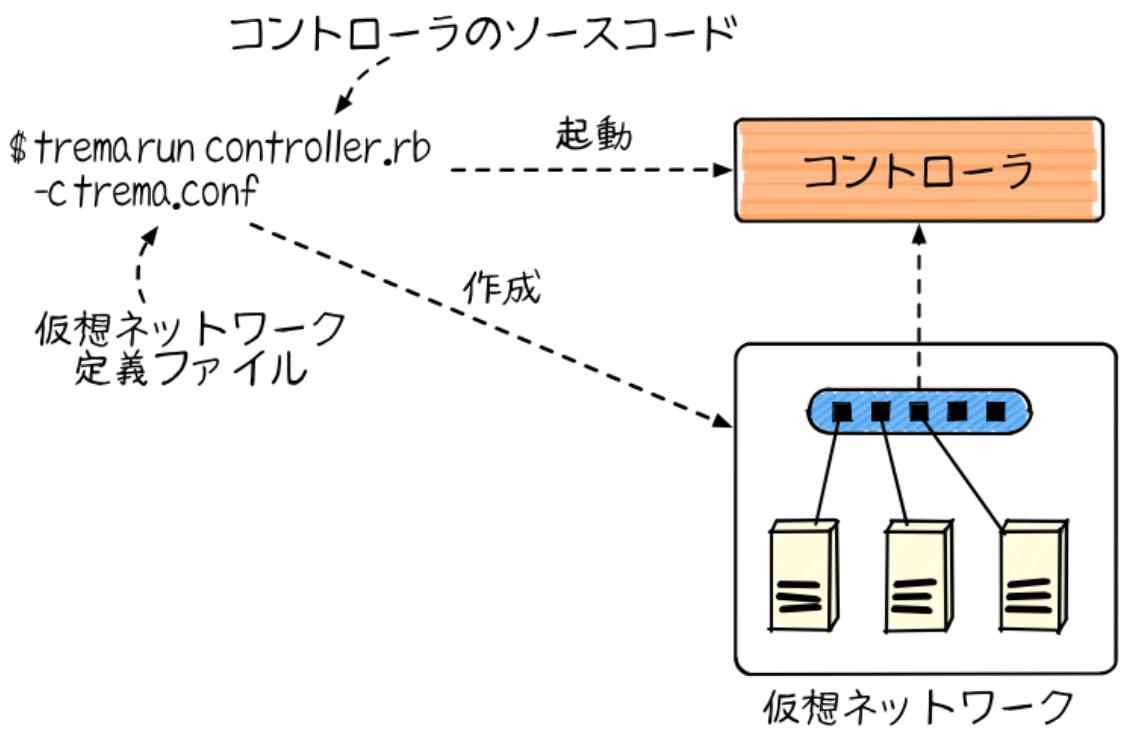
##### Trema started. Hello, 0xabc! ############

############ trema ############################## trema ######################################

# 3.5. ##### ####

trema ##### ##### ##############################################

#########, #####!####### trema run ############################ ######## ###################### trema run ##### -c ( --conf ) ################################ ########### (# 3#1)#




## ###### 3.2. ##### ##############

trema ##### git # svn ##################### trema #### run ################### ##########################################

########################### trema help ######################### trema help ##### ### ############ trema help ################################################ ##################

trema run
    ########################### (#######) #####

trema killall
    ############### ##### ###########

trema stop
    #######################

trema start
    ##########################

trema send_packets
    ######################

trema show_stats
    ########################

trema reset_stats
    ###########################

`trema port_down`
    ##############

`trema port_up`
    ##############

`trema delete_link`
    ##################

`trema netns`
    ############################

`trema dump_flows`
    ###################

########## #### ###################### #### ################################ ##############

## 3.6. ########

##############################(##)########################################## ##################################################################

| | | |
|---|---|---|
| ## | # | ###### |
| ## | `HelloTrema` , `Trema::Controller` | ####### |
| ######## | `@switches` , `@name` | `@` #### |
| #### | `:match` , `:actions` | `:` #### |

> ################### 4 ######################

################################################################## ################################################################## ############################

### 3.6.1. ##

`HelloTrema` # `Trema::Controller` ############################################ ########

```
###/#####_#####.##
```

```
# Hello World!
```

```
class HelloTrema < Trema::Controller ❶
  def start(_args)
    logger.info 'Trema started.'
  end

  def switch_ready(datapath_id)
    logger.info "Hello #{datapath_id.to_hex}!"
  end
end
```

❶ `HelloTrema` # `Trema::Controller` ### ##################################### #####(#####)#########################################################################################################################################

```
$ irb
> TokyoTower = "########4##2-8"
> TokyoTower = "######"
(irb):2: warning: already initialized constant TokyoTower
(irb):1: warning: previous definition of TokyoTower was here
=> "########4##2-8"
```

> ######## `irb` (########### ####) # #### ######################################################

`class` ###################, #####!#### `HelloTrema` ######### `class` +############# ############# `end` ########

```
###/#####_#####.##
```

```
class HelloTrema < Trema::Controller ❶
  def start(_args)
    logger.info "Trema started."
  end

  def switch_ready(datapath_id)
    logger.info "Hello #{datapath_id.to_hex}!"
  end
end ❷
```

❶ ###################

❷ #########

### ############

################################### Trema::Controller ################### #### class #### < ##### #####.

###/#####_#####.##

```
class HelloTrema < Trema::Controller ❶
  ...
end
```

❶ Trema::Controller ######## HelloTrema ###### Trema::Controller ########################## HelloTrema ################### ################

## 3.6.2. #######

########### HelloTrema ########################## main() ################## ###

################################################################## (# ###########) ################################################

######## def ####### end ######################## HelloTrema #### start ##### switch_ready ############################### ( _args # datapath_id ) ############ ########

###/#####_#####.##

```
class HelloTrema < Trema::Controller
  def start(_args) ❶
    logger.info "Trema started."
  end

  def switch_ready(datapath_id) ❷
    logger.info "Hello #{datapath_id.to_hex}!"
  end
end
```

❶ start #######

❷ switch_ready #######

##### ####

################### trema run ########################

######_##### ####
    ####################################

##########: ###### ( _ ) #######

    ############### _args  ####################################
    ################

```
# ###### _args #######
def start(_args)
  logger.info "Trema started."
end
```

```
# ###### args ######
def start(args)
  logger.info "Arguments = #{args.join ', '}"
end
```

################################

######_############ ####
    ##########################

######_## ####
    ###### ## ##### (# 5 ####################) #####################

####_####### ####
    ############# #######################

###########

    ##############################?##############################
    ################################################

    ################################################(###########
    #########)################ ################################
    #### packet_in ##############################################
    #####

    ###### Trema::Controller ############################

### 3.6.3. #####

################ (#####) ################################################################################

```
alias and BEGIN begin break case class def defined do else elsif END
end ensure false for if in module next nil not or redo rescue retry
return self super then true undef unless until when while yield
```

##########, #####!## `class` # `def` # `end` # 3 ######################## `class` ######## ################ `def` ######################

## `def` # `class` ##### `end` ################################################################################

############ #####!########################## #####!###############

### 3.6.4. ############

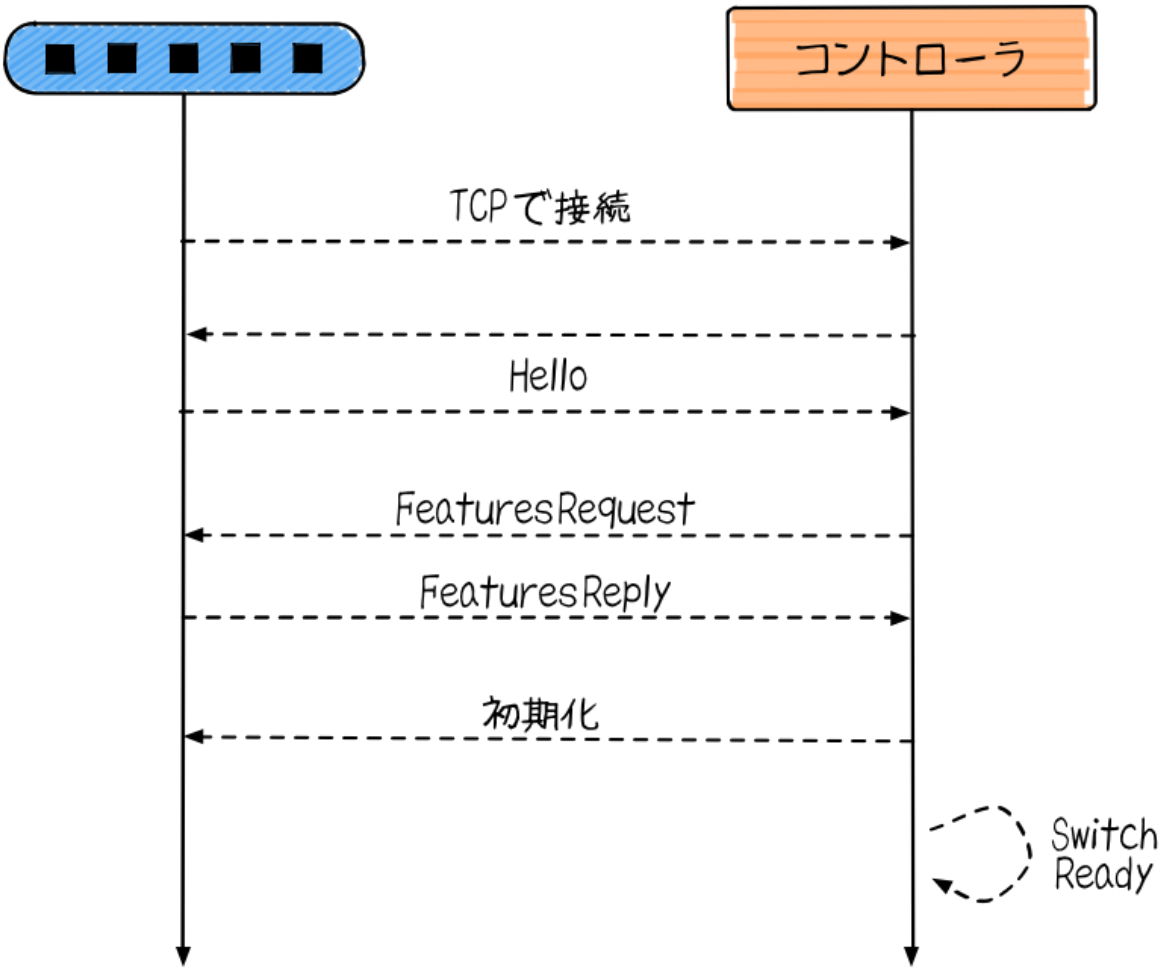
############ `switch_ready` ########### `switch_ref` ###################### ### 16###(0########)##########

#################_##### (###/#####_#####.##)

```
def switch_ready(dpid)
  logger.info "Hello #{dpid.to_hex}!"
end
```

#######_########

> ## ######## ##### `switch_ref` ######################### ##### ################ `switch_ref` ####### 3################## ######## ################################




### ###### 3.3. ######_##### ##########

################### ######## ########################## #
##### ##########################################

############### ######## ## ############## ################
######## ######## # ######## ####### #######################
########## ############### ######## ##### ###############

##########################################################
################

################## switch_ready ####################

## ######## ###16######

to_hex ####16################## switch_ready ####### dpid ###64######## ################ 0xfffb ###16################################## to_hex #16#### #################

## #############

############### logger ######

################ (###/#####_#####.##)

```
def start(_args)
  logger.info 'Trema started.'
end
```

logger ################################################### unknown (### ##) ## debug (### ##) #####6#############

#######
    ########################
#####
    ########
#####
    ###
####
    ##
####
    ########
#####
    ######

trema run ##########################################

############## (###_#######.##)

```
class TryLogging < Trema::Controller
  def start(_args)
    logger.unknown 'UNKNOWN'
    logger.fatal 'FATAL'
    logger.error 'ERROR'
    logger.warn 'WARN'
```

```
    logger.info 'INFO'
    logger.debug 'DEBUG'
  end
end
```

###################### warn ####### info # debug ##############

```
$ ./bin/trema run try_logging.rb --logging_level warn
UNKNOWN
FATAL
ERROR
WARN
```

#################################### /tmp/[###########].log ####### ############### /tmp/HelloTrema.log ############################## trema run # --log_dir ### -L ######################## /var/log/HelloTrema.log #######

```
$ ./bin/trema run try_logging.rb --log_dir /var/log/
```

### #########

logger.info ########### #{} ####################

```
logger.info "Hello #{dpid.to_hex}!"
#=> Hello 0xabc!
```

##############

```
logger.info 'Hello ' + dpid.to_hex + '!'
#=> Hello 0xabc!
```

################### + ############################################## #{} # ###############

########, #####!#################################, #####!################################################

## 3.7. ###

################################################, #####!####################################################

- ################ `Trema::Controller` ##########################
- ##############################################
- ####### `trema run` ####################
- ##############################################

################################################################################
##############

## 3.8. ####

##################################################

##### 2.2.0 ############(####://####.#########.###/##/2.2.0/###/)
#### ################ ####################

############## #2##(##### ######## ### ## ###########)
#### ######################################## #### ###############

###### (########) ##### ## #####(####://######.########.###/###############/) [5]
#############_#########################################################

[5] ##### ####://###.####.###/########/###_########_#####_##_####/

# ####### 4. #########

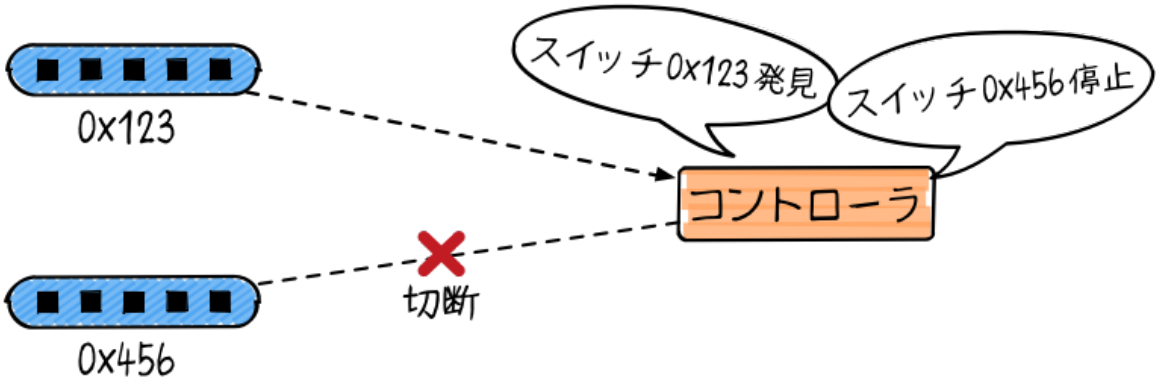
##########################################################################

## 4.1. ##############

####################1#######################################################
##############################################1 ########## #####################
#########################################################################
#####

#########################################################################
##################################################

########### 4#1##########################################################
#########################################




### ###### 4.1. ############

## 4.2. ######

################# ###### ##################

```
$ git clone https://github.com/trema/switch_monitor.git
```

################ `bundle install --binstubs` ############# `./bin/trema` ##############
#################

```
$ cd switch_monitor
$ bundle install --binstubs
```

##############################

## 4.3. #######

#########3#################################### `switch_monitor.conf` ##########
########## `datapath_id` ######### `0x1` , `0x2` , `0x3` ####################

### ######_#######.####

```
vswitch { datapath_id 0x1 }
vswitch { datapath_id 0x2 }
vswitch { datapath_id 0x3 }
```

############################## `trema run` # `-c` ##############################
######

```
$ ./bin/trema run ./lib/switch_monitor.rb -c switch_monitor.conf
SwitchMonitor started.
All =
0x3 is up (All = 0x3) ❶
0x3 manufacturer = Nicira, Inc. ❷
0x3 hardware info = ❸
0x3 software info = ❹
0x3 serial number = ❺
0x3 description = ❻
0x1 is up (All = 0x1, 0x3)
0x1 manufacturer = Nicira, Inc.
0x1 hardware info =
0x1 software info =
0x1 serial number =
0x1 description =
0x2 is up (All = 0x1, 0x2, 0x3)
0x2 manufacturer = Nicira, Inc.
0x2 hardware info =
0x2 software info =
0x2 serial number =
0x2 description =
All = 0x1, 0x2, 0x3
All = 0x1, 0x2, 0x3
```

❶ #### 0#3 #########

❷ #########

❸ ############# (#)

❹ ############# (#)

❺ ########### (#)

❻ ######### (#)

`0x1 is up` ##############################3#################################
################## ( `All = 0x1, 0x2, 0x3` ##) ########

#################################################################
`vswitch { … }` ################5##10##…################

### 4.3.1. #########/#######

############################################## `trema stop` ### `trema run` #####
################################## `0x3` ############

```
$ ./bin/trema stop 0x3
```

#### `trema run` ############## `0x3 is down` ##########

```
$ ./bin/trema run ./switch_monitor.rb -c ./switch_monitor.conf
SwitchMonitor started.
All =
0x3 is up (All = 0x3)
0x3 manufacturer = Nicira, Inc.
0x3 hardware info =
0x3 software info =
0x3 serial number =
0x3 description =
……
All = 0x1, 0x2, 0x3
All = 0x1, 0x2, 0x3
All = 0x1, 0x2, 0x3
0x3 is down (All = 0x1, 0x2) ❶
```

❶ #### 0#3 ################
########! ################################################ `trema start` ###

```
$ ./bin/trema start 0x3
```

`0x3 is up` ##############

```
$ ./bin/trema run ./switch_monitor.rb -c ./switch_monitor.conf
SwitchMonitor started.
All =
0x3 is up (All = 0x3)
0x3 manufacturer = Nicira, Inc.
0x3 hardware info =
0x3 software info =
0x3 serial number =
0x3 description =
……
```

```
All = 0x1, 0x2, 0x3
All = 0x1, 0x2, 0x3
0x3 is down (All = 0x1, 0x2)
All = 0x1, 0x2
……
All = 0x1, 0x2
All = 0x1, 0x2
0x3 is up (All = 0x1, 0x2, 0x3) ❶
```

❶ #### 0#3 ####################

###### trema stop # trema start ########################################### ### ######################################

##### #### [######## ##]

###############

##### ##### [######## ##]

#################

#############################################

## 4.4. ########

#####################(###/######_#######.##)################################ #######################

### ###/######_#######.##

```
# Switch liveness monitor.
class SwitchMonitor < Trema::Controller
  timer_event :show_all_switches, interval: 10.sec

  def start(_args)
    @switches = []
    logger.info "#{name} started."
  end

  def switch_ready(dpid)
    @switches << dpid
    logger.info "#{dpid.to_hex} is up (All = #{all_switches_in_string})"
    send_message dpid, DescriptionStats::Request.new
  end

  def switch_disconnected(dpid)
```

```
    @switches -= [dpid]
    logger.info "#{dpid.to_hex} is down (All = #{all_switches_in_string})"
  end

  def description_stats_reply(dpid, packet_in)
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} manufacturer = #{packet_in.manufacturer}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} hardware info = #{packet_in.hardware}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} software info = #{packet_in.software}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} serial number = #{packet_in.serial_number}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} description = #{packet_in.datapath}"
  end

  private

  def show_all_switches
    logger.info "All = #{all_switches_in_string}"
  end

  def all_switches_in_string
    @switches.sort.map(&:to_hex).join(', ')
  end
end
```

```
##########################################################################
## SwitchMonitor ##########################################################
##############################################
```

### 4.4.1. ############

switch_ready ################ @switches ##################### ###############
#############

```
####################_##### (###/######_#######.##)
```

```
def switch_ready(dpid)
  @switches << dpid
  logger.info "#{dpid.to_hex} is up (All = #{all_switches_in_string})"
  send_message dpid, DescriptionStats::Request.new
end
```

```
@switches # start ##################

#################### (###/######_#######.##)
```

```
def start(_args)
```

```
  @switches = []
  logger.info "#{name} started."
end
```

## 4.4.2. ########

######( @ )################################################################ ########### (##) ####################

################################################ Human ###########

```
class Human
  def initialize
    @age = 0 ❶
  end

  def birthday ❷
    @age += 1
  end
end
```

❶ ################### 0 #

❷ ##########

Human ######### Human ########################### @age #0####0## ## birthday ############# @age # 1 ########## @age # initialize ### birthday #### ###################

## ##

##############################

- [] #####
- [1, 2, 3] ######
- ["###", "###", "###"] #######

################################################## << ######

```
fruits = ["###", "###", "###"]
fruits << "######"
#=> ["###", "###", "###", "######"]
```

############# `-=` ####################################

```
fruits = ["###", "###", "###", "###", "###"]
fruits -= ["###", "###"]
#=> ["###", "###", "###"]
```

##########################################################3 ######, #####!#################################

### 4.4.3. ############

`switch_disconnected` ################################## ######################## ######

#################### _############ (###/###### _#######.##)

```
def switch_disconnected(dpid)
  @switches -= [dpid]
  logger.info "#{dpid.to_hex} is down (All = #{all_switches_in_string})"
end
```

#### `switch_ready` ########### (`-=`) ################## ### `@switches` ########## #########

### 4.4.4. ###################

############################################ `timer_event` ################## ########################################

```
# 1 ###########
class Human < Trema::Controller
  timer_event :birthday, interval: 1.year ❶
  ...

  private ❷

  def birthday ❸
    @age += 1
  end
```

❶ 1 #### `birthday` #######

❷ #################

❸ ########## birthday ####
##### Human ################## Human ################################
###########################

######################################################## private ############
##################################

########################################

```
class SwitchMonitor < Trema::Controller
  timer_event :show_all_switches, interval: 10.sec
  ...

  private

  def show_all_switches
    logger.info "All = #{all_switches_in_string}"
  end
```

##################10#### show_all_switches ##################

## ####

#################### :a # :number # :show_all_switches ########################
#######################################################################
## (6 ##################) ################

#################################################################
switch_monitor.rb ##########################

```
timer_event :show_all_switches, interval: 10.sec
```

## :show_all_switches # SwitchMonitor #######################

#####################################

```
# ####!
timer_event show_all_switches, interval: 10.sec
```

############################ show_all_switches ############################
######## timer_event ##############

##################################

### 4.4.5. ##############

################################## `send_message` ########################## ################################## `DescriptionStats::Request` ################ # `description_stats_reply` ##############

#################### _#####, ######################## _#####_##### (###/ ###### _#######.##)

```
def switch_ready(dpid)
  @switches << dpid
  logger.info "#{dpid.to_hex} is up (All = #{all_switches_in_string})"
  send_message dpid, DescriptionStats::Request.new
end

def description_stats_reply(dpid, packet_in)
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} manufacturer = #{packet_in.manufacturer}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} hardware info = #{packet_in.hardware}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} software info = #{packet_in.software}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} serial number = #{packet_in.serial_number}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} description = #{packet_in.datapath}"
end
```

######################################## 1.0#########################

| ####### | ############ | ##### |
|---|---|---|
| ######### | `DescriptionStats::Request` | `description_stats_reply` |
| ############## | `FlowStats::Request` | `flow_stats_reply` |
| ############## | `AggregateStats::Request` | `aggregate_stats_reply` |
| ############ | `TableStats::Request` | `table_stats_reply` |
| ############ | `PortStats::Request` | `port_stats_reply` |
| ######## | `QueueStats::Request` | `queue_stats_reply` |

## 4.5. ###

######################################################## ##### ########### #######

- ################## `switch_ready` # `switch_disconnected` #############

- ################# `DescriptionStats::Request` ############## `description_stats_reply` ##############
- #### ( `timer_event` ) ########################
- `trema start` # `trema stop` #######################/#####

########## ######## ############ ###### ## # #### ### #################

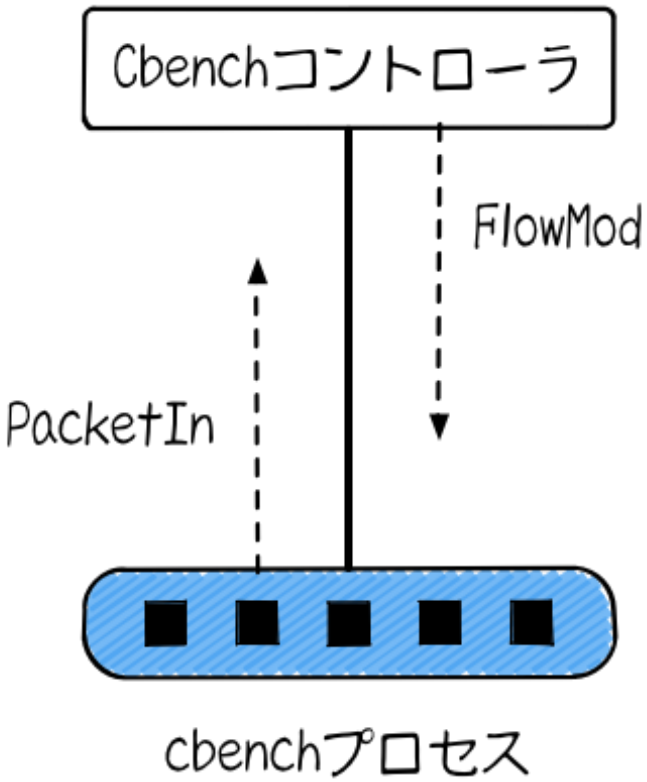
# ####### 5. ################

################################################################
######## ####### #################

## 5.1. ##############

###############1.0################################1################## #####
#################################################################
########

######## 5#1#################################################################
###### ######################### ###################### ###################
################## ######################################## ############ ###
######################




###### 5.1. ####################

## 5.2. ######

###################.### [1] ##########################################/###########
#######################################################

```
$ git clone https://github.com/trema/cbench.git
```

################ `bundle install --binstubs` ############# `./bin/trema` ##### ###### ## ##### `./bin/cbench` ##########################

```
$ cd cbench
$ bundle install --binstubs
```

############################

## 5.3. #######

##########################################

```
$ ./bin/trema run ./lib/cbench.rb
```

##############################################[2]#

```
$ ./bin/cbench --port 6653 --switches 1 --loops 10 --ms-per-test 10000 --delay 1000 --throughput
cbench: controller benchmarking tool
  running in mode 'latency'
  connecting to controller at localhost:6653
  faking 1 switches :: 10 tests each; 10000 ms per test
  with 100000 unique source MACs per switch
  starting test with 1000 ms delay after features_reply
  ignoring first 1 "warmup" and last 0 "cooldown" loops
  debugging info is off
1  switches: fmods/sec:  807   total = 0.080652 per ms
1  switches: fmods/sec:  797   total = 0.079694 per ms
1  switches: fmods/sec:  799   total = 0.079730 per ms
1  switches: fmods/sec:  797   total = 0.079698 per ms
1  switches: fmods/sec:  801   total = 0.080003 per ms
1  switches: fmods/sec:  800   total = 0.079965 per ms
1  switches: fmods/sec:  802   total = 0.080159 per ms
```

[1] ####://#######.########.###/
[2] ###### ################ ###### #####################################

```
1   switches: fmods/sec:  802   total = 0.080182 per ms
1   switches: fmods/sec:  806   total = 0.080549 per ms
1   switches: fmods/sec:  801   total = 0.080082 per ms
RESULT: 1 switches 9 tests min/max/avg/stdev = 79.69/80.55/80.01/0.26 responses/s
```

######10##########10################# fmods/sec ########### 1 ###### #### ### ##########################  ############ ################

## 5.4. ########

######################################## ####### ########################## ## ###/######.## ###

### ###/######.##

```
# A simple openflow controller for benchmarking.
class Cbench < Trema::Controller
  def start(_args)
    logger.info "#{name} started."
  end

  def packet_in(datapath_id, packet_in)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      match: ExactMatch.new(packet_in),
      buffer_id: packet_in.buffer_id,
      actions: SendOutPort.new(packet_in.in_port + 1)
    )
  end
end
```

###### ##################################################################################################

### 5.4.1. ########

###### ############################

- logger.info(…) (3 #######, #####!####)
- ExactMatch.new(…)
- packet_in.buffer_id
- SendOutPort.new(…)
- packet_in.in_port

##########################################################

```
door.open
```

##### open ####################################

#####################################

```
'redrum'.reverse
#=> "murder"
```

#############################

############################################ ( join ) ####

```
['M', 'A', 'S', 'H'].join('#')
#=> "M#A#S#H"
```

#####################################################

## 5.4.2. #########

############ (###/######.##)

```
def start(_args)
  logger.info "#{name} started."
end
```

####### start ############################################ _args ##############
###

## 5.4.3. ######_######

################################ ############################## #############
####

```
def packet_in(datapath_id, packet_in)
  ...
end
```

packet_in ################### ###########(##########)# ######## ## ####### ####
###########

## ######## ###

`packet_in` #####2########### ############### `PacketIn` ############### `PacketIn` ########3###############

- ###### ################################################################ #####
- ###### ############## (############################)######## `?` ########
- ################################################

`PacketIn` ################################################################ #################5#1#######

### ##### 5.1. ######## ######## (##)

| #### | ## |
|---|---|
| :###_#### | ##################### |
| :##_#### | ######################## |
| :########? | ###### ############################## #### |
| :######_## | ##################### ## ### |
| :#####_###### | ############ |
| :######_###_####### | ################## |
| :###########_###_####### | ################# |
| :###4? | ########4##### `true` ### |
| :###4_######## | ############# |
| :###4_######_####### | ################# |
| :###4_###########_####### | ################ |
| :###4_### | ############## |
| :###? | ############# `true` ### |
| :###_######_#### | #################### |
| :###_###########_#### | ################## |
| :###? | ############# `true` ### |
| :###_######_#### | #################### |
| :###_###########_#### | #################### |

| #### | ## |
|---|---|
| :####? | ################### `true` ### |
| :####_### | ########### |
| :####_######## | ########### |
| :#####_#### | ######### |

##################################################3 #######, #####!###### ##### ################

## 5.4.4. #### ### ####

#################################### ############################

- ########: ###### ## ################ (##)
- #####: ###### ## ########_#####+1########
- ######: ###### ## ############

#####################

### ######## (######## 1.0)

################ `send_flow_mod_add` #### `match:` ##################### ( `Match.new(…)` ### `ExactMatch.new(…)` ) ######

```
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  match: Match.new(...), ❶
  ...
)
```

❶ ############# `match:` ##### ############## `Match.new` ############################ ### ##### 00:50:56:#0:00:08 # #### ## # 3 ################### #### ### ###################

```
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  match: Match.new(
          source_mac_address: '00:50:56:c0:00:08'
          vlan_vid: 3
        )
```

```
  ...
```

######## 1.0 ################## 12 ##### `Match.new` ############12############(#5#2)#

## ##### 5.2. ########### #####.### ######

| ##### | ## |
|---|---|
| :##_#### | ############ |
| :######_###_####### | ########## |
| :###########_###_####### | ######### |
| :#####_#### | ######### |
| :######_##_####### | ######### |
| :###########_##_####### | ######## |
| :##_######## | ########## |
| :### | ########### |
| :#########_######_#### | ###/############ |
| :#########_###########_#### | ###/########### |
| :####_### | #### #### |
| :####_######## | ############ |

2########## ##################### 1.3 ########## 40 ########## ########### 1.3 ## ##### ########################### 1.0 ###### ######### ######## 1.3 ### 8##########1.3############14##### (#########)###########

## ##### ######### (######## 1.0)

############################## ##################### ######################### #############12######################### ########

############# `Match.new` ###12######################### ###########

```
def packet_in(datapath_id, packet_in)
  ...
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    match: Match.new(
          in_port: packet_in.in_port,
```

```
        source_mac_address: packet_in.source_mac_address,
        destination_mac_address: packet_in.destination_mac_address,
        ...
```

#############1######12############################## ############## ######## ####################

```
def packet_out(datapath_id, packet_in)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    match: ExactMatch.new(packet_in),
    ...
```

###1#######! ################################

> ########## ###### ######## 1.0 ############# 1.3 ############## ################ #########

## ##### (########1.0)

############ `send_flow_mod_add` #### `actions:` ################################ #[3]#

```
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  ...
  actions: ##### ❶
)

###

send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  ...
  actions: [#####0, #####1, #####2, ...] ❷
)
```

❶ `actions:` ############ 1 ###

❷ `actions:` ################

########## ##########2############## #### ### ####################

[3] ########1.0 ########################################### #### ### ########

```
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  ...
  actions: [StripVlanHeader.new, SendOutPort.new(2)] ❶
)
```

❶ # # # # # # 2 # # #

# # # # # # # #5#3#13# # # # # # # # # # # # # # #

```
  actions: ...,
  buffer_id: packet_in.buffer_id ❶
)
```

❶ #### ### ########### ## ###
`send_flow_mod_add` #################5#4######

## ##### 5.4. ####_####_###_##############

| ##### | ## |
|---|---|
| :##### | ############################## `Match` ######### `ExactMatch` ########### |
| :####### | ################################### ############ (#4#####) ######### |
| :######_## | ########################### ## ##### |
| :####_####### | ################################### #########0##################### |
| :####_####### | ##########################0########### ########### |
| :######## | ###########(####16############ #)####### ########################### ##################### `0xffff` (#####) |
| :####_####_####### | ########################### ######### ############################### `true` |
| :#####_####### | `true` ############################### ################################### `false` |
| :##### | `true` ################################ ##################################### ########## `false` |
| :###### | #########64########################### ############################## |

################################

########1.0 ##2######### ################################## ######################################## 1.3 ############## ##8##########1.3##########################

## 5.5. ##########

##########################  ######  ##################################
packet_in ###################### ###### ######## ###### ## ################
### 1 ################

##### ##################################################################
multi_threaded_packet_in ##################################################
##################

```
def start(_args)
  @db = DB.new ❶
end

# ######## packet_in ####
def multi_threaded_packet_in(datapath_id, packet_in) ❷
  # !!! ### @db ######## !!!
  return if @db.lookup(packet_in.in_port)
  @db.add packet_in.source_mac_address, packet_in.in_port
end
```

❶ ################

❷ ########## ###### ## ####
##############################################################

### 5.5.1. ####

################### ##### ######################### ##### ################ 1 #
################

```
def start(_args)
  @db = DB.new
  @mutex = Mutex.new ❶
end

def multi_threaded_packet_in(datapath_id, packet_in)
  @mutex.synchronize do ❷
    # ####@db##########
    return if @db.lookup(packet_in.in_port)
    @db.add packet_in.source_mac_address, packet_in.in_port
  end
```

```
end
```

❶ ###### #####

❷ do…end ####### 1 ############

################## packet_in ################################################ ############## ##### ############

```
def start(_args)
  @db = DB.new
  @mutex = Mutex.new
end

def packet_in(datapath_id, packet_in)
  Thread.start do ❶
    @mutex.synchronize do
      return if @db.lookup(packet_in.in_port)
      @db.add packet_in.source_mac_address, packet_in.in_port
    end
  end
end
```

❶ packet_in ###############

################## Thread.start ################################## ## ###### Tread.new ####################

############################################################## packet_in ### ################## packet_in ##########

```
def start(_args)
  @db = DB.new
  @mutex = Mutex.new
  @work_queue = Queue.new ❶
  10.times { start_worker_thread } ❷
end

def packet_in(datapath_id, packet_in)
  @work_queue.push [datapath_id, packet_in] ❸
end

private

# ###########
def start_worker_thread ❹
```

```
  Thread.new do
    loop do
      datapath_id, packet_in = @work_queue.pop ❺
      @mutex.synchronize do
        next if @db.lookup(packet_in.in_port)
        @db.add packet_in.source_mac_address, packet_in.in_port
      end
    end
  end
end
```

❶ ####################

❷ ######## 10 #########

❸ ###### ## ##### ########_## # ###### ## ########

❹ #######################

❺ ############ ########_## # ###### ## ########### #############
## @mutex.synchronize do … end ################
########################## ###### #################

### /#####_########_######.##

```
# A simple openflow controller for benchmarking (multi-threaded version).
class MultiThreadedCbench < Trema::Controller
  def start(_args)
    @work_queue = Queue.new
    10.times { start_worker_thread }
    logger.info 'Cbench started.'
  end

  def packet_in(datapath_id, packet_in)
    @work_queue.push [datapath_id, packet_in]
  end

  private

  def start_worker_thread
    Thread.new do
      loop do
        datapath_id, packet_in = @work_queue.pop
        send_flow_mod_add(datapath_id,
                          match: ExactMatch.new(packet_in),
                          buffer_id: packet_in.buffer_id,
                          actions: SendOutPort.new(packet_in.in_port + 1))
      end
    end
```

```
  end
end
```

################

```
$ ./bin/trema run lib/multi_threaded_cbench.rb
```

####### ###### #######

```
$ ./bin/cbench --port 6653 --switches 1 --loops 10 --ms-per-test 10000 --delay 1000 --throughput
cbench: controller benchmarking tool
   running in mode 'throughput'
   connecting to controller at localhost:6653
   faking 1 switches :: 10 tests each; 10000 ms per test
   with 100000 unique source MACs per switch
   starting test with 1000 ms delay after features_reply
   ignoring first 1 "warmup" and last 0 "cooldown" loops
   debugging info is off
1   switches: fmods/sec:  748   total = 0.074746 per ms
1   switches: fmods/sec:  714   total = 0.071319 per ms
1   switches: fmods/sec:  705   total = 0.070448 per ms
1   switches: fmods/sec:  704   total = 0.070376 per ms
1   switches: fmods/sec:  718   total = 0.071747 per ms
1   switches: fmods/sec:  734   total = 0.073346 per ms
1   switches: fmods/sec:  739   total = 0.073763 per ms
1   switches: fmods/sec:  736   total = 0.073487 per ms
1   switches: fmods/sec:  732   total = 0.073146 per ms
1   switches: fmods/sec:  730   total = 0.072917 per ms
RESULT: 1 switches 9 tests min/max/avg/stdev = 70.38/73.76/72.28/1.25 responses/s
```

################################## 2 ################ ###### ## ############## ##################################### ## ################################## ##################################################################

## 5.6. #########

#################### ###### ########## ###### ## ################## ####### ##### ### ################################### ###### ## ####### send_flow_mod_add ### ## #### ### ################################### #### ### ################2 ## ########## #### ### # send_message #######

################################## ###### ################################## ##

### ###/####_######.##

```
# A simple openflow controller for benchmarking (fast version).
class FastCbench < Trema::Controller
  def start(_args)
    logger.info "#{name} started."
  end

  def packet_in(dpid, packet_in)
    @flow_mod ||= create_flow_mod_binary(packet_in) ❶
    send_message dpid, @flow_mod ❷
  end

  private

  def create_flow_mod_binary(packet_in)
    options = {
      command: :add,
      priority: 0,
      transaction_id: 0,
      idle_timeout: 0,
      hard_timeout: 0,
      buffer_id: packet_in.buffer_id,
      match: ExactMatch.new(packet_in),
      actions: SendOutPort.new(packet_in.in_port + 1)
    }
    FlowMod.new(options).to_binary.tap do |flow_mod| ❸
      def flow_mod.to_binary
        self
      end
    end
  end
end
```

❶ ### `@flow_mod` # `nil` ######## `create_flow_mod_binary` # #### ### ########### #########

❷ ####### #### ### ###### ###### #######

❸ `send_message` #### ##### ##### `FlowMod#to_binary` ######################### #######

################## 6000 ## #### ### ################## 10 ###########!

```
cbench: controller benchmarking tool
  running in mode 'throughput'
  connecting to controller at localhost:6653
```

```
  faking 1 switches :: 10 tests each; 10000 ms per test
  with 100000 unique source MACs per switch
  starting test with 1000 ms delay after features_reply
  ignoring first 1 "warmup" and last 0 "cooldown" loops
  debugging info is off
1  switches: fmods/sec:  6741   total = 0.674018 per ms
1  switches: fmods/sec:  6400   total = 0.639859 per ms
1  switches: fmods/sec:  6508   total = 0.650710 per ms
1  switches: fmods/sec:  6334   total = 0.633349 per ms
1  switches: fmods/sec:  6325   total = 0.632465 per ms
1  switches: fmods/sec:  6293   total = 0.629207 per ms
1  switches: fmods/sec:  6276   total = 0.627579 per ms
1  switches: fmods/sec:  6332   total = 0.633133 per ms
1  switches: fmods/sec:  6219   total = 0.621860 per ms
1  switches: fmods/sec:  6293   total = 0.629266 per ms
RESULT: 1 switches 9 tests min/max/avg/stdev = 621.86/650.71/633.05/7.77 responses/s
```

##########

> ###### ################################ ################## ## ###### ######################### ########## (####://###.#################.###/) # 1 ### 100 ### #### ### ############# ################################ #/# ######################### #####################
>
> #### ### # 1 ### 100 ################################### ## # 1 # ## 100 ###################### ## # 1 ### 100 ################### ################################### 1 ### 100 ############### ########################
>
> ####### ###### ## ############################################ ################################################################ ###### ## ################## ###### ## ########### ###### ## ## ############################
>
> ###### ################################################################ ############# ##################

## 5.7. ###

###### ####### ##############################################

- ############### `send_flow_mod_add` ############################

- ##########################
- ########### ##############################
- #######################

######## ################################################################
##############################################

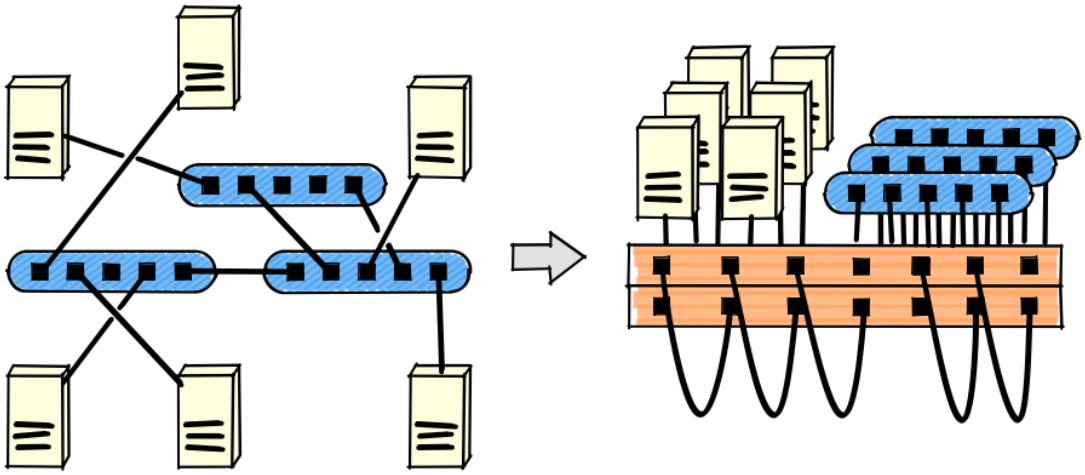
# ####### 6. ################

##########################################################################
##############

## 6.1. ##################

##########################################################################
##########################################################################
##########################################

###################### (# 6#1)##############################################
##########################################################################
################################



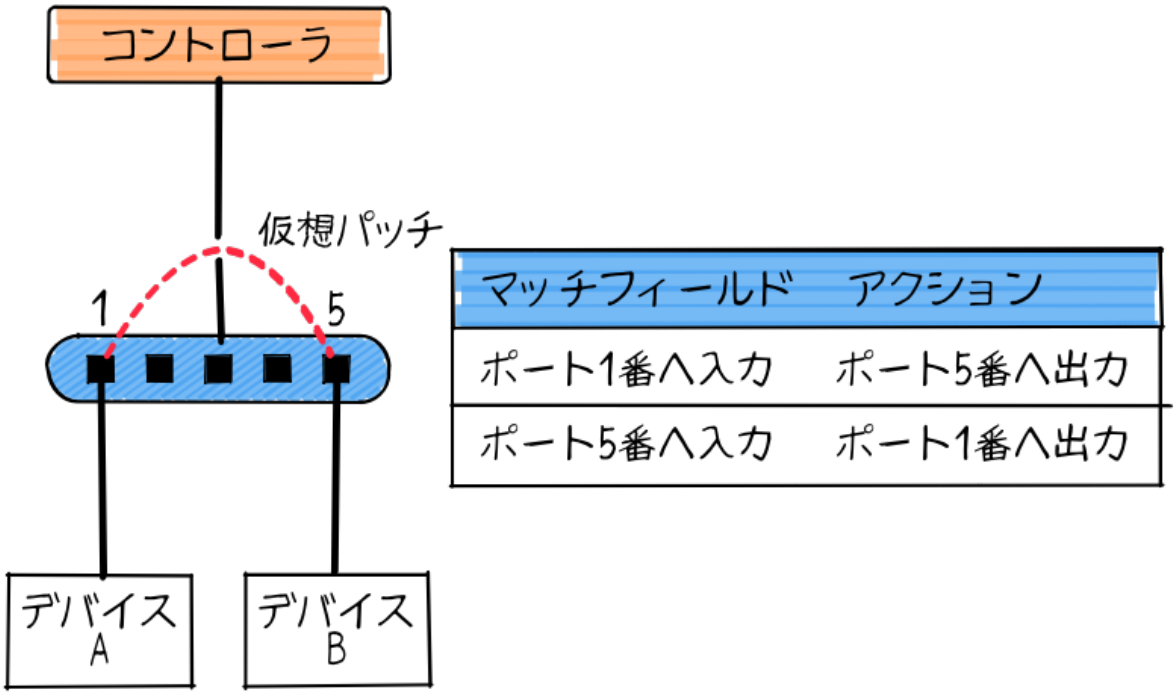
### ###### 6.1. ######################

#################################################################################################################################################

## 6.2. #########################

#################################################################################################################################################

#### ################### 6#2 ##############################################(#######)#################################################################
##




### ###### 6.2. ######################

#### 6#2 ########1##5#############################2####

- ###1##############5######
- ###5##############1######

#################################################################################################################################

#######################################

## 6.3. #######

#########################/#####_##########  (#####://######.###/#####/#####_#####) #############

```
$ git clone https://github.com/trema/patch_panel.git
```

################ `bundle install --binstubs` ####################################

```
$ cd patch_panel
```

```
$ bundle install --binstubs
```

###################### 3 ####

- `lib/patch_panel.rb` : ########
- `patch_panel.conf` : ##############
- `bin/patch_panel` : #############

###########################

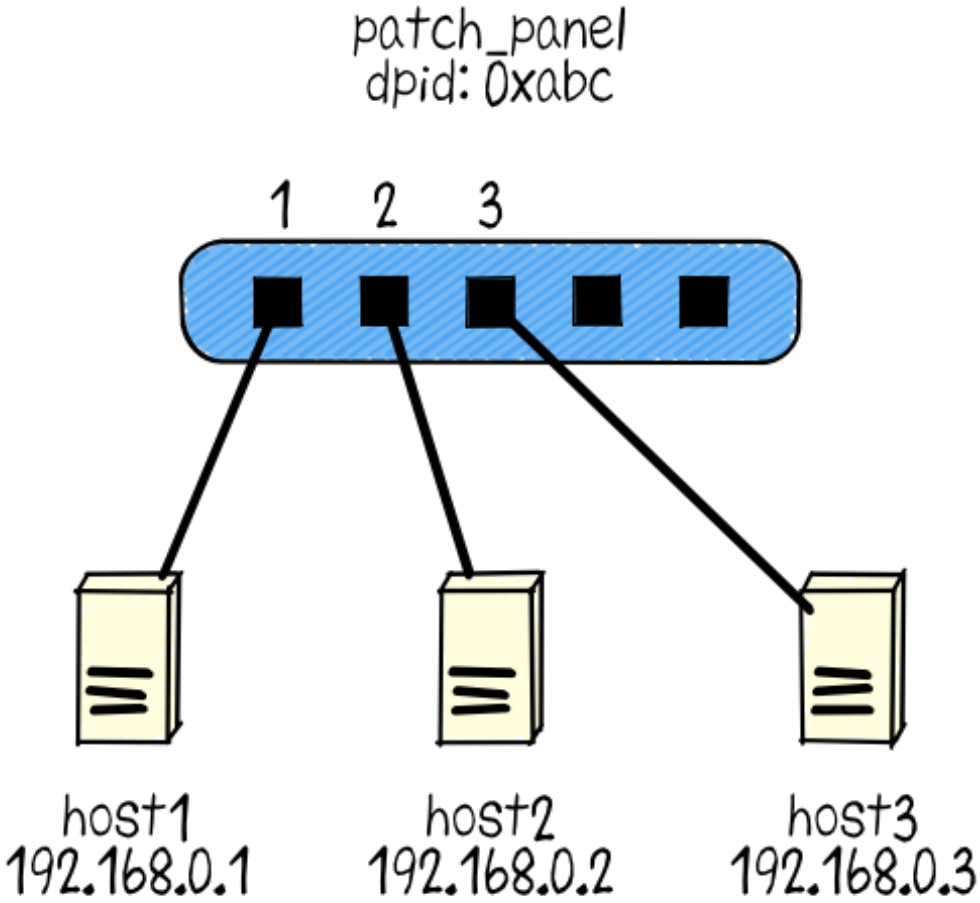
## 6.3.1. ###########

############## `patch_panel.conf` ########################################## `vhost` ############### `link` ##############################

#####_#####.####

```
vswitch('patch_panel') { datapath_id 0xabc }

vhost ('host1') { ip '192.168.0.1' }
vhost ('host2') { ip '192.168.0.2' }
vhost ('host3') { ip '192.168.0.3' }

link 'patch_panel', 'host1'
link 'patch_panel', 'host2'
link 'patch_panel', 'host3'
```

################ `0xabc` # 3 ####### `host1` , `host2` , `host3` ######## (# 6#3)########## ############# ( `link` #####) ########### `link` ######################## 1 ##### 2 ### 3 ##… ########




## ###### 6.3. ###### #####_#####.#### ###########

########################################## `trema run` # `-c` ############### `trema run` ##########################

```
$ ./bin/trema run ./lib/patch_panel.rb -c patch_panel.conf
```

########################################################## `trema send_packets` ############1#####2####################

```
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host2
$ ./bin/trema send_packets --source host2 --dest host1
```

############################0##################### `trema show_stats` #######

```
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
```

```
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host2
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
```

trema show_stats ##################################1 # ####2 ########### 1 ## #########################

########## ./bin/patch_panel ##################### 0#### #### 1 ##### 2 ######## ###########

```
$ ./bin/patch_panel create 0xabc 1 2
```

########1 # ####2 ##################################

```
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host2
$ ./bin/trema send_packets --source host2 --dest host1
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 2 packets
Packets received:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host2
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 2 packets
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
```

#################################################################

## 6.4. ########

##################/#####_#####.#####

### ###/#####_#####.##

```
# Software patch-panel.
class PatchPanel < Trema::Controller
  def start(_args)
    @patch = Hash.new([].freeze)
    logger.info "#{name} started."
  end
```

```
  def switch_ready(dpid)
    @patch[dpid].each do |port_a, port_b|
      delete_flow_entries dpid, port_a, port_b
      add_flow_entries dpid, port_a, port_b
    end
  end

  def create_patch(dpid, port_a, port_b)
    add_flow_entries dpid, port_a, port_b
    @patch[dpid] += [port_a, port_b].sort
  end

  def delete_patch(dpid, port_a, port_b)
    delete_flow_entries dpid, port_a, port_b
    @patch[dpid] -= [port_a, port_b].sort
  end

  private

  def add_flow_entries(dpid, port_a, port_b)
    send_flow_mod_add(dpid,
                      match: Match.new(in_port: port_a),
                      actions: SendOutPort.new(port_b))
    send_flow_mod_add(dpid,
                      match: Match.new(in_port: port_b),
                      actions: SendOutPort.new(port_a))
  end

  def delete_flow_entries(dpid, port_a, port_b)
    send_flow_mod_delete(dpid, match: Match.new(in_port: port_a))
    send_flow_mod_delete(dpid, match: Match.new(in_port: port_b))
  end
end
```

################################

- ##################################
- #######3 #######, #####!##### switch_ready ################ delete_flow_entries # add_flow_entries ##################################
- create_patch # delete_patch #######################################
- add_flow_entries ###### send_flow_mod_add #2#######1##########2############ ####2################

##########################################################################
##########

## 6.4.1. #########

#########################

################ (###/#####_#####.##)

```
def start(_args)
  @patch = Hash.new([].freeze)
  logger.info "#{name} started."
end
```

`@patch` ######################### (##) ######################## ######## ####### ######################### 0#1 #### 1 ## 4 ############# 0#2 #### 1 ## 2 ##### 3 ## 4 ############ `@patch` ##############

| ######## ## (##) | ##### (####) |
|---|---|
| 0#1 | [[1, 4]] |
| 0#2 | [[1, 2], [3, 4]] |

### ########## `Hash.new([].freeze)`

`Hash.new` ### (########) ### `[].freeze` ######################### ## #### ############# `.freeze` ######## `[]` #### `<<` ############ ####################

```
hash = Hash.new([])

p hash[1]        #=> []
p hash[1] << "bar" #=> ["bar"]
p hash[1]        #=> ["bar"]

p hash[2]        #=> ["bar"] ##### ["bar"] ########
```

######## `.freeze` ##################

```
hash = Hash.new([].freeze)
hash[0] += [0] ############OK
hash[1] << 1
# ### `<<': can't modify frozen array (TypeError)
```

## 6.4.2. ########

################## ( {} ) ############################################## : #####
###########

```
animals = { armadillo: '#####', boar: '####' }
```

#### ###### ############? ############################

```
animals[:boar] #=> "####"
```

############## (#########) #################### (#########) ###########

###################

```
animals[:cow] = '##'
```

############################################################## ######## ## #
############# (##) ##########

```
@patch[0x1] = [[1, 2], [3, 4]]
```

#################################### send_flow_mod_add ##################
( : ) ######################################################################
######

```
def flow_mod(message, port_no)
  send_flow_mod_add(
    message.datapath_id,
    match: ExactMatch.new(message),
    actions: SendOutPort.new(port_no)
  )
end

# #####

def flow_mod(message, port_no)
  send_flow_mod_add(
    message.datapath_id,
    { match: ExactMatch.new(message),
```

```
    actions: SendOutPort.new(port_no) }
  )
end
```

## 6.4.3. ######_#########

switch_ready ################################################ @patch #####
#############(######################)##################

#################_##### (###/#####_#####.##)

```
def switch_ready(dpid)
  @patch[dpid].each do |port_a, port_b| ❶
    delete_flow_entries dpid, port_a, port_b ❷
    add_flow_entries dpid, port_a, port_b ❸
  end
end
```

❶ @patch[dpid].each ###################### (##)##### port_a # port_b #2#####
######################

❷ ######### delete_flow_entries ##############

❸ ######### add_flow_entries ################################ ############
######2#######

## 6.4.4. #####

#############################################################

#############

```
fruits = ["###", "###", "###"]

fruits.each do |each|
  puts each
end

####:
###
###
###
```

###### fruits # each ######### fruits ################## do ###### each # ######
############### each ########################## ( do…end ) #########

##########################################

```
# ##### ### #########
```

```
for (int i = 0; i < 3; i++) {
  puts fruits[i];
}
```

##### ### ######################### i ######### i < 3 ######################
#######################################################

#### 5 ##################################

```
# start_worker_thread ##### 10 ###
10.times { start_worker_thread }

# #############

# n ## 1#10 ########### n #######
10.times { |n| start_worker_thread }
```

## times ################## 10 ################################ ## ########### ##### 10.times { start_worker_thread } (10 # #####_######_###### ###)############## ######

## 6.4.5. ###_####_############

1#####(2#########)########## add_flow_entries #############

```
##############_####_####### (###/#####_#####.##)
```

```
def add_flow_entries(dpid, port_a, port_b)
  send_flow_mod_add(dpid,
                    match: Match.new(in_port: port_a),
                    actions: SendOutPort.new(port_b))
  send_flow_mod_add(dpid,
                    match: Match.new(in_port: port_b),
                    actions: SendOutPort.new(port_a))
end
```

add_flow_entries ###2######## send_flow_mod_add #########################

```
##############_####_####### (###/#####_#####.##)
```

```
send_flow_mod_add(dpid,
                  match: Match.new(in_port: port_a),
                  actions: SendOutPort.new(port_b))
```

######## port_a ################ port_b ##############################2#######
#########

- match : ######( :in_port )# port_a ########## Match ######
- actions : #### port_b ########## SendOutPort #####

## 6.4.6. ######_####_############

delete_flow_entries ################### add_flow_entries ################## delete_flow_entries ####################################

#################_####_####### (###/#####_#####.##)

```
def delete_flow_entries(dpid, port_a, port_b)
  send_flow_mod_delete(dpid, match: Match.new(in_port: port_a))
  send_flow_mod_delete(dpid, match: Match.new(in_port: port_b))
end
```

########## send_flow_mod_delete # send_flow_mod_add ########## match: ########
###########

## 6.4.7. ######_#####, ######_#########

create_patch # delete_patch ###### bin/patch_panel ###########################

create_patch ###### add_flow_entries ###################### @patch #############

#################_##### (###/#####_#####.##)

```
def create_patch(dpid, port_a, port_b)
  add_flow_entries dpid, port_a, port_b
  @patch[dpid] += [port_a, port_b].sort
end
```

## delete_patch ##################################

#################_##### (###/#####_#####.##)

```
def delete_patch(dpid, port_a, port_b)
```

```
  delete_flow_entries dpid, port_a, port_b
  @patch[dpid] -= [port_a, port_b].sort
end
```

## 6.4.8. ###/#####_##### ####

PatchPanel ########### bin/patch_panel ### PatchPanel #### create_patch # delete_patch ############ patch_panel create # patch_panel delete ### 2 ############ ####

########### ### (#####://######.###/########5000/###) ######################## ### ## patch_panel create # patch_panel delete ##################################### ### ################################

### /#####_#####

```
#!/usr/bin/env ruby

require 'rubygems'
require 'bundler'
Bundler.setup :default

require 'gli'
require 'trema'

# patch_panel command
module PatchPanelApp
  extend GLI::App

  desc 'Creates a new patch' ❶
  arg_name 'dpid port#1 port#2'
  command :create do |c|
    c.desc 'Location to find socket files'
    c.flag [:S, :socket_dir], default_value: Trema::DEFAULT_SOCKET_DIR

    c.action do |_global_options, options, args|
      dpid = args[0].hex
      port1 = args[1].to_i
      port2 = args[2].to_i
      Trema.trema_process('PatchPanel', options[:socket_dir]).controller.
        create_patch(dpid, port1, port2)
    end
  end

  desc 'Deletes a patch' ❷
```

```
  arg_name 'dpid port#1 port#2'
  command :delete do |c|
    c.desc 'Location to find socket files'
    c.flag [:S, :socket_dir], default_value: Trema::DEFAULT_SOCKET_DIR

    c.action do |_global_options, options, args|
      dpid = args[0].hex
      port1 = args[1].to_i
      port2 = args[2].to_i
      Trema.trema_process('PatchPanel', options[:socket_dir]).controller.
        delete_patch(dpid, port1, port2)
    end
  end

  exit run(ARGV)
end
```

❶ `create` #########

❷ `delete` #########

### ############### `command` ####### do … end ################################ ###########################

###### #########

```
desc 'Creates a new patch' ❶
arg_name 'dpid port#1 port#2' ❷
command :create do |c|
  c.desc 'Location to find socket files' ❸
  c.flag [:S, :socket_dir], default_value: Trema::DEFAULT_SOCKET_DIR ❹

  c.action do |_global_options, options, args|
    dpid = args[0].hex ❺
    port1 = args[1].to_i ❻
    port2 = args[2].to_i ❼
    Trema.trema_process('PatchPanel', options[:socket_dir]).controller.
      create_patch(dpid, port1, port2) ❽
  end
end
```

❶ `create` #########

❷ ########

❸ `-S` ( `--socket_dir` ) ########

❹ `-S` ( `--socket_dir` ) ###############

❺❻❼########
❽ `PatchPanel` #### `create_patch` ########
################# `PatchPanel` #################

```
Trema.trema_process('PatchPanel', options[:socket_dir]).controller.create_patch(dpid, port1, port2)
```

## `Trema.trema_process.controller` #######################( `PatchPanel` ########)#
################# `create_patch` ##################################

## 6.5. ###

############################################################

- ##################################
- ################
- ########################

#######################################################################
#######################################################################
###########

############### 3 ##### ######## ######## #### ###, ###### ##, ###### ### #######
##################

# ####### 7. ################

#######################################################################
##

## 7.1. #############

#######################################################################
#######################################

- ##########################################
- ####################################

#######################################################################
#######################################################################
##

#########################################################

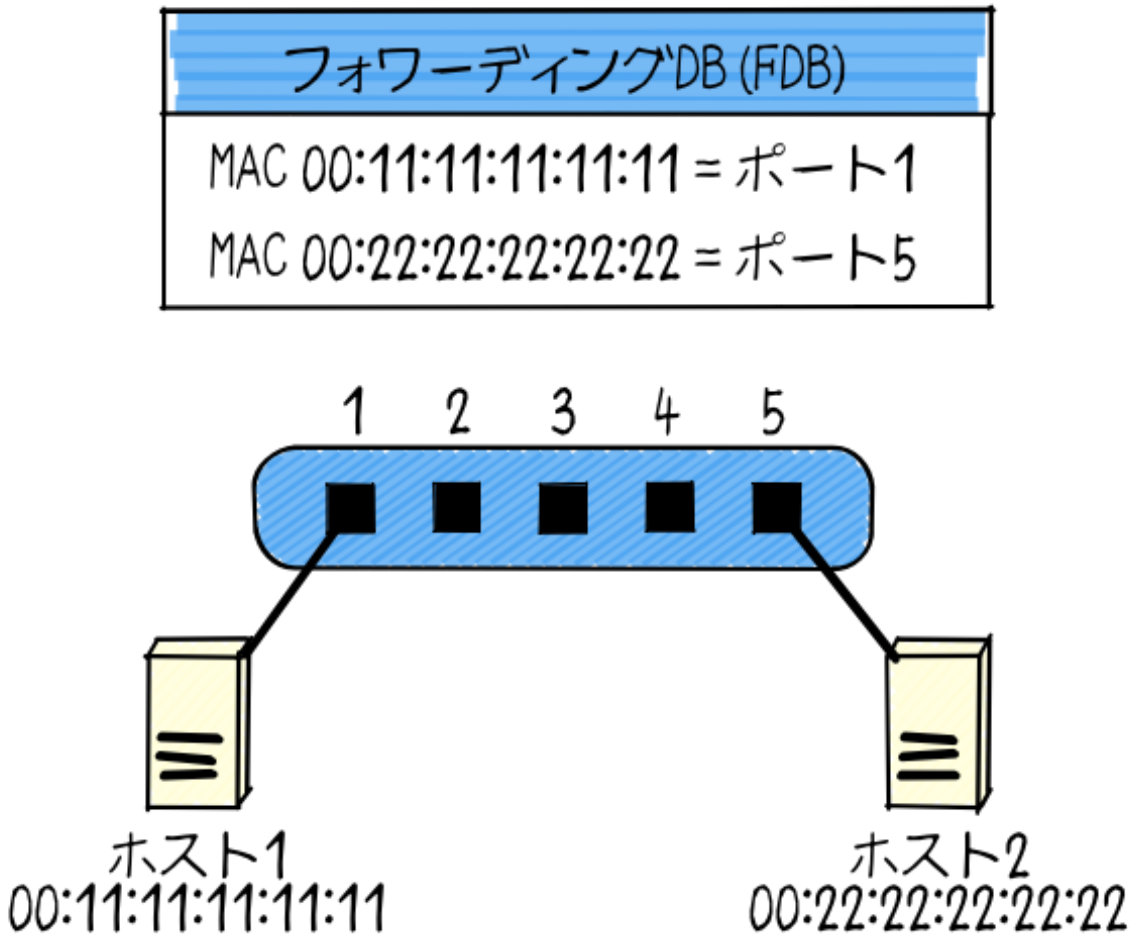
- ### (#12#,#13#,#14#)
- ########## (#16#)
- ########## (#17#)

##########################################################################
######################

## 7.2. ##############

################################(# 7#1)###############1##5######1#2########
##############################################

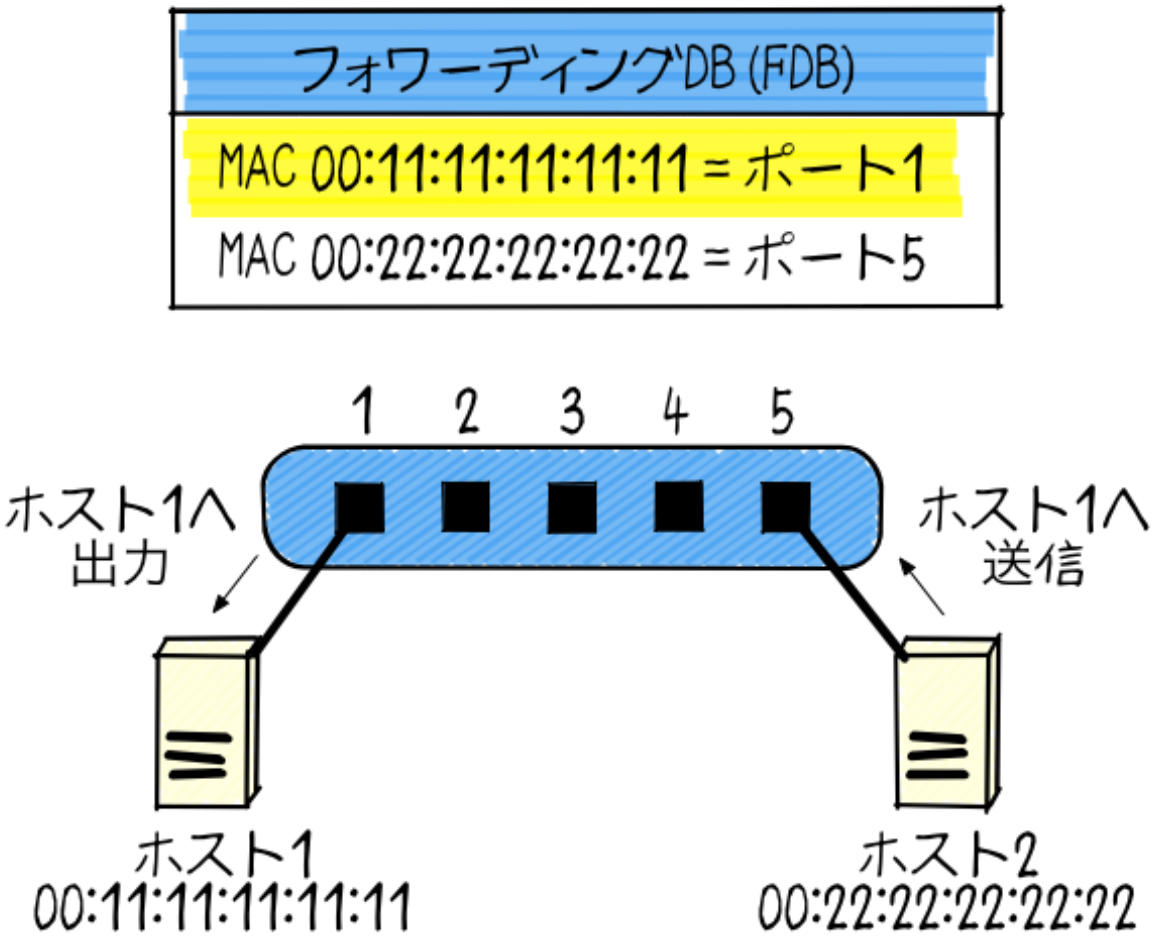
##########################################################################
#########################(###)####################+################




### ###### 7.1. ##########1#####2##################

######2####1######################### 7#2############1########

1. #################(00:11:11:11:11:11)#####################################
2. #############00:11:11:11:11:11=###1##############1##########


フォワーディングDB (FDB)
MAC 00:11:11:11:11:11 = ポート1
MAC 00:22:22:22:22:22 = ポート5
1 2 3 4 5
ホスト1へ
出力
ホスト1へ
送信
ホスト1
00:11:11:11:11:11
ホスト2
00:22:22:22:22:22

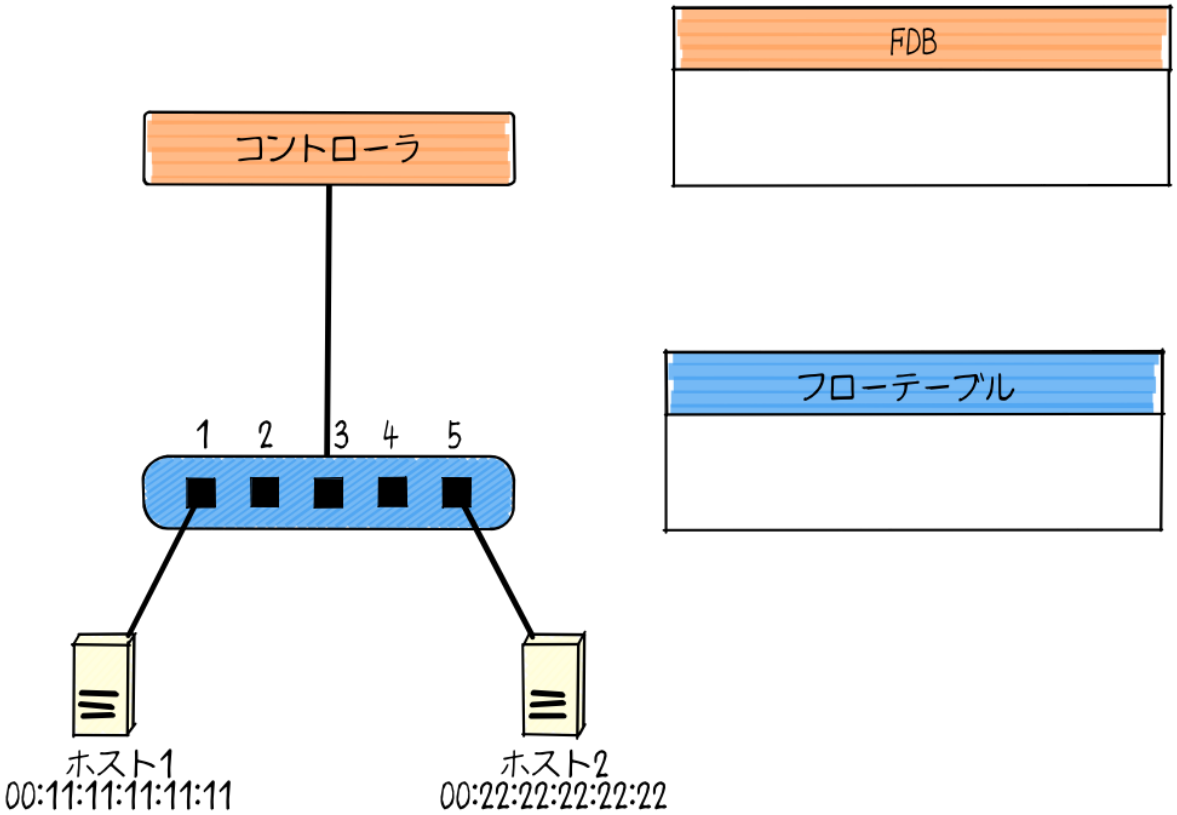
###### 7.2. ################1####

################################### (#########) ####################

## 7.3. ##################(#########)####

######################### 7#3##############################2####

- ###############################
- ########################################



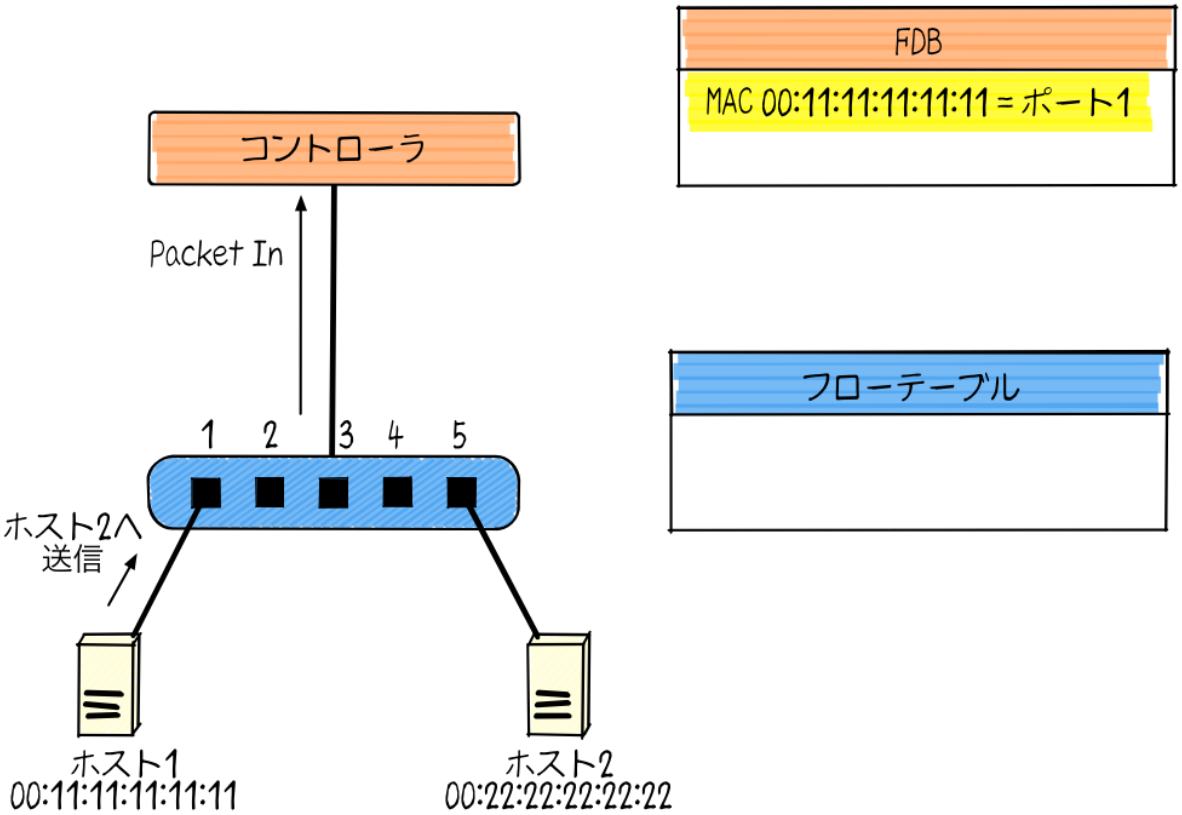

## ###### 7.3. ######################(#########)###

#################################

### 7.3.1. ###### ###############

########1####2##########################1####################(# 7#4)#

1. ######################### ###############
2. ############ ##################################################1#########
   ##00:11:11:11:11:11#####################

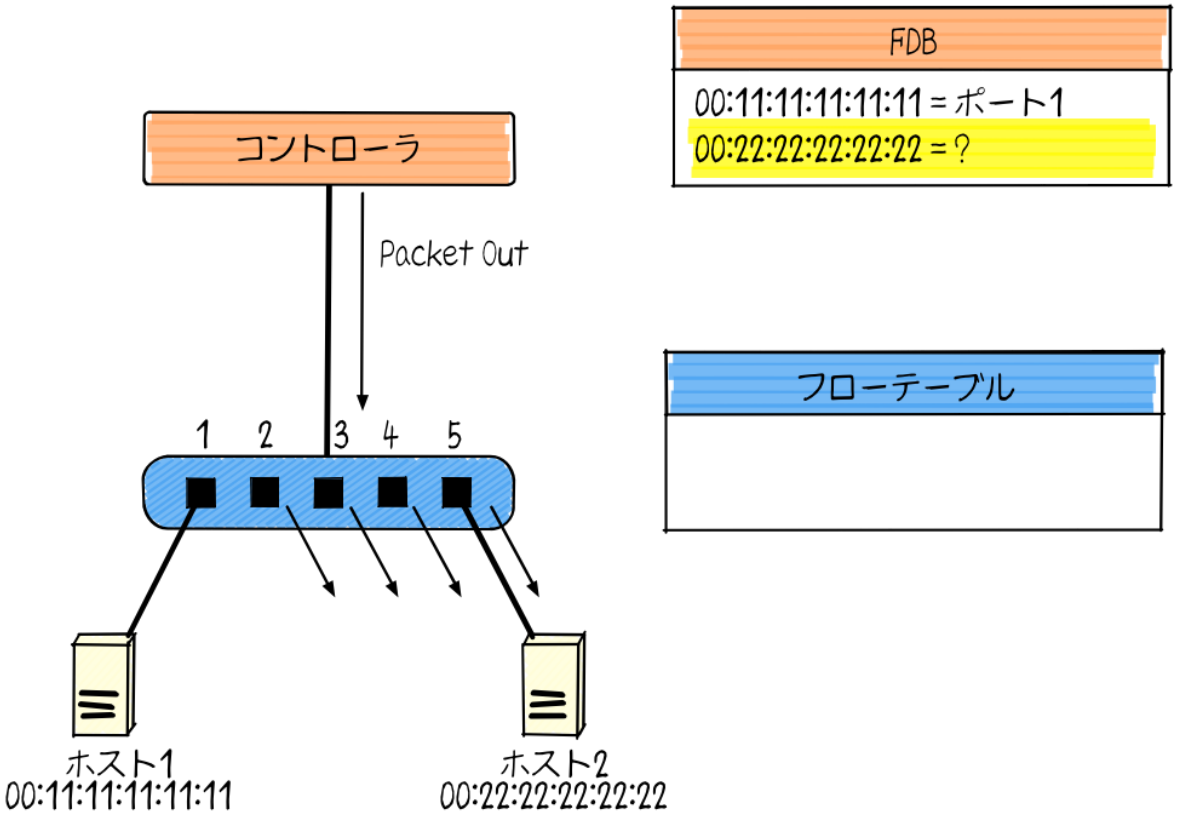



## ###### 7.4. ###### ##################################

### 7.3.2. ###### ###########(#######)

#######################################################################
#######################(# 7#5)#

1. ############ ##############################################2############
   ######################
2. ############################## ########################################5#
   #######2########

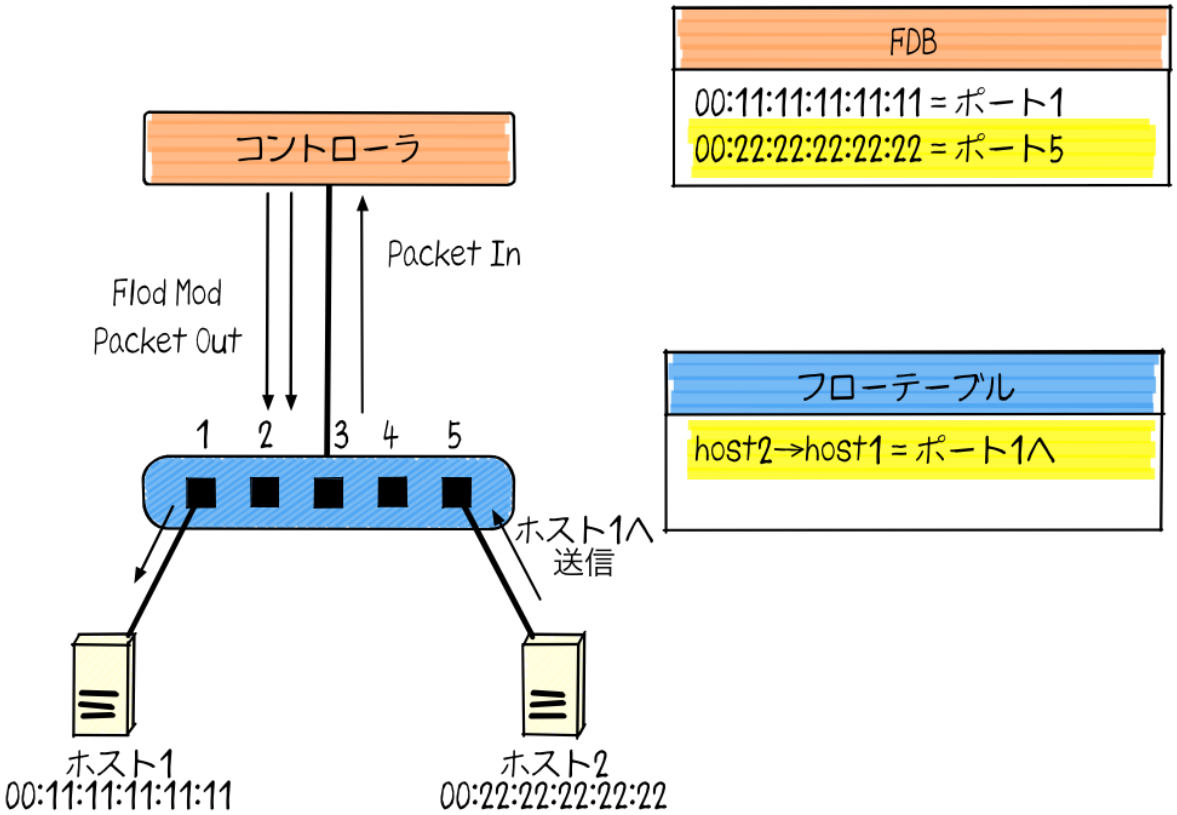



## ###### 7.5. ################################################ ######## ##########

### 7.3.3. #########(#### ########## ###)

########2####1####################(# 7#6)#

1. ############################## ###########
2. ############### #############5###########00:22:22:22:22:22################## #####
3. ###### ##############################################1=####### 00:11:11:11:11:11#################1######
4. ####2#####1##########1#################### ######################## ######## ########(##### = 1)####### ###############1#####




### ###### 7.6. ######2#################################################
#1####

#######################2#####1##########1##############################2###
#1######################## ######################################

######1#####2#################################################################
###1#####2############# 7#6###############1#####2#########5################
########################### ##################################

## 7.4. #######

#################################################################/
########_########### (#####://######.###/#####/########_######) #############

```
$ git clone https://github.com/trema/learning_switch.git
```

################ bundle install --binstubs ####################################

```
$ cd learning_switch
$ bundle install --binstubs
```

#######################################1#######2############# `trema.conf` ####
####

#####.####

```
vswitch('lsw') {
  datapath_id 0xabc
}

vhost ('host1') {
  ip '192.168.0.1'
}

vhost ('host2') {
  ip '192.168.0.2'
}

link 'lsw', 'host1'
link 'lsw', 'host2'
```

##### `trema run` # `-c` ##################################

```
$ ./bin/trema run ./lib/learning_switch.rb -c trema.conf
```

########## `trema send_packets` ############1#####2##################

```
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host2
$ ./bin/trema send_packets --source host2 --dest host1
```

`trema show_stats` #########1#####2#####################################

```
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
Packets received:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host2
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
```

##########################################

## 7.5. ########

################ ###/########_######.## # ###/###.## # 2 ################### (###/########_######.##) ############# #### private ##########################

### ###/########_######.##

```
require 'fdb'

# An OpenFlow controller that emulates an ethernet switch.
class LearningSwitch < Trema::Controller
  timer_event :age_fdb, interval: 5.sec

  def start(_argv)
    @fdb = FDB.new
    logger.info "#{name} started."
  end

  def switch_ready(datapath_id)
    # Drop BPDU frames
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      priority: 100,
      match: Match.new(destination_mac_address: '01:80:C2:00:00:00')
    )
  end

  def packet_in(_datapath_id, packet_in)
    @fdb.learn packet_in.source_mac, packet_in.in_port
    flow_mod_and_packet_out packet_in
  end

  def age_fdb
    @fdb.age
  end

  private

  def flow_mod_and_packet_out(packet_in)
    port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
    flow_mod(packet_in, port_no) if port_no
    packet_out(packet_in, port_no || :flood)
  end

  def flow_mod(packet_in, port_no)
    send_flow_mod_add(
```

```
      packet_in.datapath_id,
      match: ExactMatch.new(packet_in),
      actions: SendOutPort.new(port_no)
    )
  end

  def packet_out(packet_in, port_no)
    send_packet_out(
      packet_in.datapath_id,
      packet_in: packet_in,
      actions: SendOutPort.new(port_no)
    )
  end
end
```

##################################

- ############# `LearningSwitch` ########
- ######## `start` ################################## `lib/fdb.rb` #######
- ############ `swtich_ready` ######### ### ##### `01:80:C2:00:00:00` ############# ###########
- `packet_in` ####### `flow_mod_and_packet_out` ######### `@fdb` ############# ## `flow_mod` # `packet_out` ############# ########## ######################### ######(#######)######## `:flood` #####

############## `packet_in` ############# 3 ################################## ################################## ## #############

- ###############
- ################### ########## ######
- ###########################

############## ####################

## 7.5.1. #######(###### ##)###

############### ##############################################################

1. ##################################### ################# ( `@fdb` ) #####
2. ######################################## ( `@fdb.lookup` ####)

#####################_##, ###################_###_###_######_### (###/########_######.##)

```
def packet_in(_datapath_id, packet_in)
  @fdb.learn packet_in.source_mac, packet_in.in_port
  flow_mod_and_packet_out packet_in
end

def flow_mod_and_packet_out(packet_in)
  port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
  flow_mod(packet_in, port_no) if port_no
  packet_out(packet_in, port_no || :flood)
end
```

## ################(############### ###)

#################################################### (flow_mod ####)## ######## ########################## (packet_out ####)#

###################_###_###_######_### (###/########_######.##)

```
def flow_mod_and_packet_out(packet_in)
  port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
  flow_mod(packet_in, port_no) if port_no
  packet_out(packet_in, port_no || :flood)
end
```

## flow_mod ##### packet_out ######### send_flow_mod_add (# 5 ########### ##########) ### send_packet_out (###### ######) #################

###################_###, #####################_### (###/########_######.##)

```
def flow_mod(packet_in, port_no)
  send_flow_mod_add(
    packet_in.datapath_id,
    match: ExactMatch.new(packet_in),
    actions: SendOutPort.new(port_no)
  )
end

def packet_out(packet_in, port_no)
  send_packet_out(
    packet_in.datapath_id,
    packet_in: packet_in,
    actions: SendOutPort.new(port_no)
```

```
  )
end
```

## 7.5.2. ###### ### ###

###### ##################1#################################################
##################_######_######2##########

```
send_packet_out(datapath_id, options)
```

###################

datapath_id
: ###### ######################## ##

options
: ###### ################################################################
: ##############################################

###### ############### ##################################################
##############################################

### ################### #######

############################################ buffer_id ########################
################## ########

```
send_packet_out(
  datapath_id,
  buffer_id: packet_in.buffer_id,
  raw_data: packet_in.raw_data,
  actions: SendOutPort.new(port_number)
)
```

############################################################## 2 ######### ##
##########################################################

### ############################

############## ###### ### ########## raw_data ################################
################ ###### ### ####################

```
send_packet_out(
  datapath_id,
  raw_data: packet_in.raw_data,
  actions: SendOutPort.new(port_number)
)
```

######### packet_in ################## ( .raw_data ############)#

```
send_packet_out(
  datapath_id,
  packet_in: packet_in,
  actions: SendOutPort.new(port_number)
)
```

### 7.5.3. #########

options #####################

buffer_id
: ################## ## ################################### ###### ### ### ######### (##########################)

raw_data
: ###### ### ################ buffer_id ############################## ###### ### ##############

packet_in
: raw_data ### in_port ########################## ## ############## ###### ## ##########

actions
: ###### ### ############################## 1 ################

#### ################## (#######)

########################## ###### ## ##############################
flow_mod_and_packet_out ################### :flood ##### packet_out ##########
## :flood ##### ######### ####################### ## ##################

#### ################## _### _### _###### _### (###/########_######.##)

```
def flow_mod_and_packet_out(packet_in)
  port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
  flow_mod(packet_in, port_no) if port_no
```

```
  packet_out(packet_in, port_no || :flood)
end
```

## 7.5.4. ### ###

########_######.## ##### require 'fdb' ############ ###.## ######## require ####### # #include # #### # import ################## ####### ###.## ################## ### .## #### require 'fdb' ######################/ ######################### ###/ ########_######/##########.## ########### require 'learning_switch/extensions' ######

###.## ######################## ### ########### FDB ##########

### /### .##

```
# A database that keeps pairs of a MAC address and a port number
class FDB
  # Forwarding database (FDB) entry.
  class Entry
    DEFAULT_AGE_MAX = 300

    attr_reader :mac
    attr_reader :port_no

    def initialize(mac, port_no, age_max = DEFAULT_AGE_MAX)
      @mac = mac
      @port_no = port_no
      @age_max = age_max
      @last_update = Time.now
    end

    def update(port_no)
      @port_no = port_no
      @last_update = Time.now
    end

    def aged_out?
      Time.now - @last_update > @age_max
    end
  end

  def initialize
    @db = {}
  end

  def lookup(mac)
```

```
    entry = @db[mac]
    entry && entry.port_no
  end

  def learn(mac, port_no)
    entry = @db[mac]
    if entry
      entry.update port_no
    else
      @db[mac] = Entry.new(mac, port_no)
    end
  end

  def age
    @db.delete_if { |_mac, entry| entry.aged_out? }
  end
end
```

FDB ####3###### lookup # learn # age ###### lookup ######## ### ################ ##### learn ###### ### ################################ age ########## ####### ######################## ( FDB::Entry#aged_out? ###) ######

### 7.5.5. ##############

switch_ready ######## ### ##### 01:80:C2:00:00:00 ##########################

###/########_######.##

```
def switch_ref(datapath_id)
  # Drop BPDU frames
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    priority: 100,
    match: Match.new(destination_mac_address: '01:80:C2:00:00:00')
  )
end
```

#### 7.5.6. ##### ########## ### ### ###

- ############## ##################################################
- ###### ###################### ################################
- ###### ########################################### #############

################ ######## 1.3 ############################################## ##############

# ####### 8. ########1.3##########

######### ########1.3 #############1.0####################

## 8.1. ########1.0###############

#7#################################################

#############

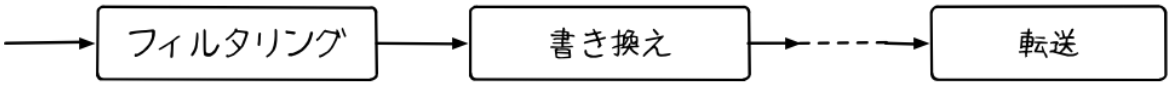
########1.0################ 1 ##########################################
##################################################

####################

########1.0############################## ########### switch_ready ########
########################################### packet_in ##################
#############

## 8.2. #########

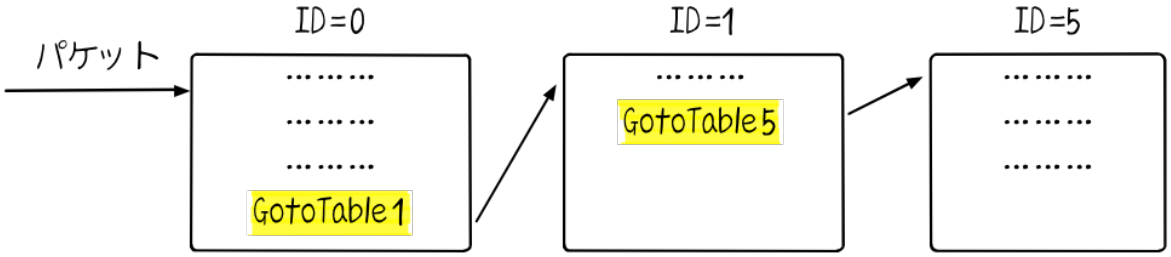
######## 1 #### ########1.0 #############1.3 ##################1.3 ##
1 ##########################################################################
####################→######→ … →#######################################
########################################




### ###### 8.1. ########1.3#######################

### 8.2.1. #######

################ ## # 0 ######### ######## ################################
############### ###### ## ############### ## # 0 ##############################
##### ######## ################ ## ################### ## ######## ## ######
########




## ###### 8.2. #### ## 0 ##### ######## ######################

## 8.2.2. ########1.3 ######

########### ########################################1.3 ####################
#######################################

#################################### ########1.0 ##########################
########### #### ############ # ####, ###6 ################## (#8#1)#

### ##### 8.1. ######## 1.3 ########### (##############)

| ########## | ## |
|---|---|
| SetField | ########################### |
| CopyTtlOut | ########################### |
| CopyTtlIn | ######################### |
| SetMplsTtl | ################### |
| DecrementMplsTtl | ##############1#### |
| PushVlanHeader | #################### |
| PopVlanHeader | ###################### |
| PushMpls | ###################### |
| PopMpls | ############################### |
| Group | ###################### |
| SetIpTtl | ###4##########6#### ########### |
| DecrementIpTtl | ###4##########6#### ######1#### |
| PushPbb | ################### (##### ###) ###### #### |
| PopPbb | ##################### (##### ###) #### ####### |

################################################################## (#8#2)#

### ##### 8.2. ######## 1.3 ########### (#######)

| ########## | ## |
|---|---|
| SendOutPort | ######### (##) ############# |
| SetQueue | SendOutPort ######################### |

## 8.2.3. #########

######################################################## ######### ###### ########## #### ### # instructions ############################################ #############

######### ###############

```
# #### 0 ### 1 ## GotoTable
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  table_id: 0,
    ...
  instructions: GotoTable.new(1)
)
```

################################################ 2 #####

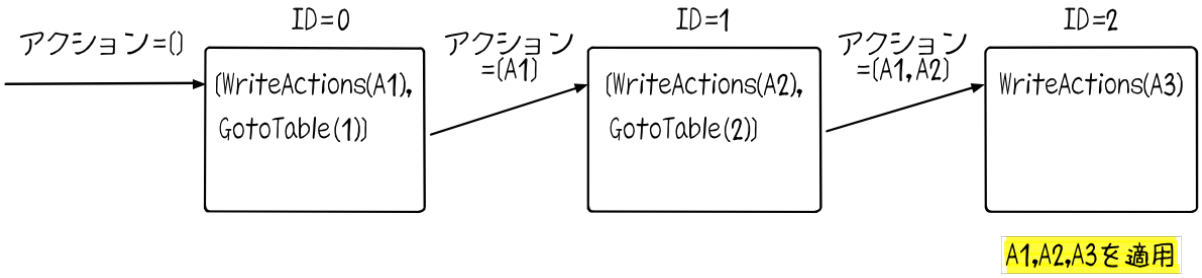
- Apply #######################
- WriteActions ##############################

Apply ##############################################1.0 # #### ### # actions ### ###############

##### #####################

```
# ### 1 ####
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
    ...
  instructions: Apply.new(SendOutPort.new(1))
)
```

WriteActions ######################################## ################
WriteActions ################################### ######## ################
##########################################




### ###### 8.3. ############ ###############

#################################################################
## WriteActions ################## Clear ####################################
################

### ##### 8.3. ######## 1.3 ###############

| ############## | ## |
|---|---|
| GotoTable | ########################## |
| Apply | ############## |
| WriteActions | ###################### |
| Clear | ############# |
| WriteMetadata | ########### 64### ########## |
| Meter | ################## |

## 8.3. ########1.3 ## ###### ##

########1.3############################ ########### ########1.0 ##############
#######################################1.3#######################
SendOutPort.new(:controller) (############## ######## ####) ####################
##

## 8.4. ########1.3###############

########1.3##################2##############################

###########
    ####################################

######
    ##################################################

## 8.5. ########

########1.3#################/########_######13.########

###/########_######13.##

```
require 'fdb'

# An OpenFlow controller that emulates an ethernet switch.
class LearningSwitch13 < Trema::Controller
  timer_event :age_fdb, interval: 5.sec

  INGRESS_FILTERING_TABLE_ID = 0
  FORWARDING_TABLE_ID = 1

  AGING_TIME = 180

  def start(_args)
    @fdb = FDB.new
    logger.info "#{name} started."
  end

  def switch_ready(datapath_id)
    add_bpdu_drop_flow_entry(datapath_id)
    add_default_broadcast_flow_entry(datapath_id)
    add_default_flooding_flow_entry(datapath_id)
    add_default_forwarding_flow_entry(datapath_id)
  end

  def packet_in(_datapath_id, packet_in)
    @fdb.learn(packet_in.source_mac, packet_in.in_port)
    add_forwarding_flow_and_packet_out(packet_in)
  end

  def age_fdb
    @fdb.age
  end

  private

  def add_forwarding_flow_and_packet_out(packet_in)
    port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
    add_forwarding_flow_entry(packet_in, port_no) if port_no
```

```
  packet_out(packet_in, port_no || :flood)
end

def add_forwarding_flow_entry(packet_in, port_no)
  send_flow_mod_add(
    packet_in.datapath_id,
    table_id: FORWARDING_TABLE_ID,
    idle_timeout: AGING_TIME,
    priority: 2,
    match: Match.new(in_port: packet_in.in_port,
                     destination_mac_address: packet_in.destination_mac,
                     source_mac_address: packet_in.source_mac),
    instructions: Apply.new(SendOutPort.new(port_no))
  )
end

def packet_out(packet_in, port_no)
  send_packet_out(
    packet_in.datapath_id,
    packet_in: packet_in,
    actions: SendOutPort.new(port_no)
  )
end

def add_default_broadcast_flow_entry(datapath_id)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    table_id: FORWARDING_TABLE_ID,
    idle_timeout: 0,
    priority: 3,
    match: Match.new(destination_mac_address: 'ff:ff:ff:ff:ff:ff'),
    instructions: Apply.new(SendOutPort.new(:flood))
  )
end

def add_default_flooding_flow_entry(datapath_id)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    table_id: FORWARDING_TABLE_ID,
    idle_timeout: 0,
    priority: 1,
    match: Match.new,
    instructions: Apply.new(SendOutPort.new(:controller))
  )
end
```

```
  def add_bpdu_drop_flow_entry(datapath_id)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      table_id: INGRESS_FILTERING_TABLE_ID,
      idle_timeout: 0,
      priority: 2,
      match: Match.new(destination_mac_address: '01:80:C2:00:00:00')
    )
  end

  def add_default_forwarding_flow_entry(datapath_id)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      table_id: INGRESS_FILTERING_TABLE_ID,
      idle_timeout: 0,
      priority: 1,
      match: Match.new,
      instructions: GotoTable.new(FORWARDING_TABLE_ID)
    )
  end
end
```

## 8.5.1. ######_##### ####

switch_ready ##########################################################

##############13#######_##### (###/########_######13.##)

```
def switch_ready(datapath_id)
  add_bpdu_drop_flow_entry(datapath_id)
  add_default_broadcast_flow_entry(datapath_id)
  add_default_flooding_flow_entry(datapath_id)
  add_default_forwarding_flow_entry(datapath_id)
end
```

####### add_bpdu_drop_flow_entry ############### #### ######################## ##

##############13####_####_####_####_##### (###/########_######13.##)

```
def add_bpdu_drop_flow_entry(datapath_id)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    table_id: INGRESS_FILTERING_TABLE_ID,
    idle_timeout: 0,
```

```
    priority: 2,
    match: Match.new(destination_mac_address: '01:80:C2:00:00:00')
  )
end
```

#### ### ######################### 3 ####

table_id
: ################################################ table_id ## 0 ( INGRESS_FILTERING_TABLE_ID ) #######

idle_timeout
: #### ############################ idle_timeout ## 0 (############) #######

priority
: ######################################### = 0 ######################### 2 #######

## add_default_forwarding_flow_entry ####### ############ FORWARDING_TABLE_ID #######

##############13####_#######_##########_####_##### (###/########_######13.##)

```
def add_default_forwarding_flow_entry(datapath_id)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    table_id: INGRESS_FILTERING_TABLE_ID,
    idle_timeout: 0,
    priority: 1,
    match: Match.new,
    instructions: GotoTable.new(FORWARDING_TABLE_ID)
  )
end
```

############## 3 ####

priority
: #### 1 ########################## (### = 2) #################

match
: ##############################################

instructions
: GotoTable(FORWARDING_TABLE_ID) ################## 1 ######

### add_default_flooding_flow_entry ##### ### ################################ ######

##############13####_#######_########_####_##### (###/########_######13.##)

```
def add_default_flooding_flow_entry(datapath_id)
  send_flow_mod_add(
    datapath_id,
    table_id: FORWARDING_TABLE_ID,
    idle_timeout: 0,
    priority: 1,
    match: Match.new,
    instructions: Apply.new(SendOutPort.new(:controller))
  )
end
```

table_id
: ################## ######## ##### ## INGRESS_FILTERING_TABLE_ID ## FORWARDING_TABLE_ID ################## table_id ## FORWARDING_TABLE_ID #######

priority
: ############ ### ################################### 1 #######

instructions
: ########### SendOutPort.new(:flood) ############# ## ######## SendOutPort.new(:controller) # Apply ################

## 8.5.2. ######_## ####

packet_in ############# ## ######### ### #### + ## #### ################## ## # #########_#####_## ##########################

##############13#######_##### (###/########_######13.##)

```
def packet_in(_datapath_id, packet_in)
  @fdb.learn(packet_in.source_mac, packet_in.in_port)
  add_forwarding_flow_and_packet_out(packet_in)
end

private

def add_forwarding_flow_and_packet_out(packet_in)
  port_no = @fdb.lookup(packet_in.destination_mac)
  add_forwarding_flow_entry(packet_in, port_no) if port_no
```

```
  packet_out(packet_in, port_no || :flood)
end

def add_forwarding_flow_entry(packet_in, port_no)
  send_flow_mod_add(
    packet_in.datapath_id,
    table_id: FORWARDING_TABLE_ID,
    idle_timeout: AGING_TIME,
    priority: 2,
    match: Match.new(in_port: packet_in.in_port,
                     destination_mac_address: packet_in.destination_mac,
                     source_mac_address: packet_in.source_mac),
    instructions: Apply.new(SendOutPort.new(port_no))
  )
end
```

#### #### ### ##################

`priority`
: #### `FORWARDING_TABLE_ID` ######### (#######) ######################### ########################

`idle_timeout`
: ##############################1.0 ####################################

`match` , `instructions`
: ### ###### ## #### ### ################## ## # `in_port` ######################### ##########

## 8.6. ###

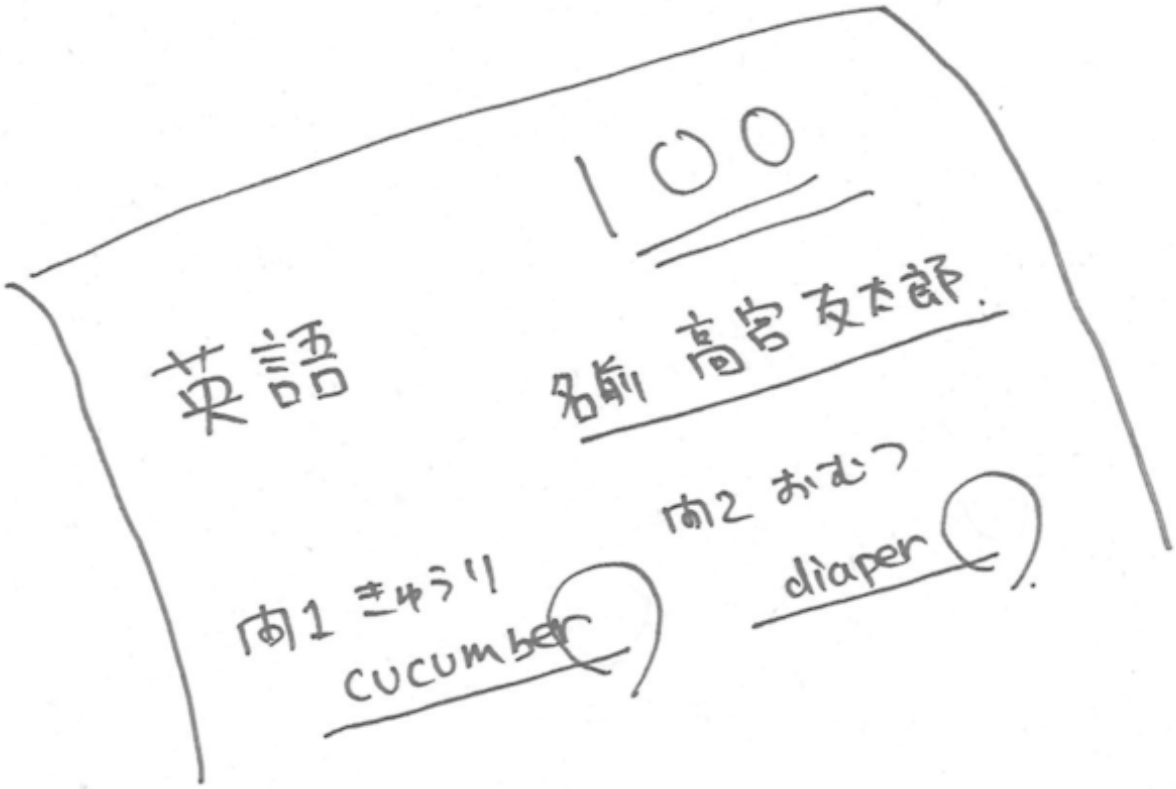
########## ########1.3 ##################1.0 ##############

- ##############################################
- `GotoTable` ##########################################
- ########1.3 ######## ###### ## ####################1.0 ################# `packet_in` ##################

#################################################################### ###################

# ####### 9. ##### ########

##########################################################################
##############




## 9.1. ############

##########################################################################
#########

##########################################################################
##########################################################################
##########################################################################
##

##########################################################################
##########################################################################
##############################

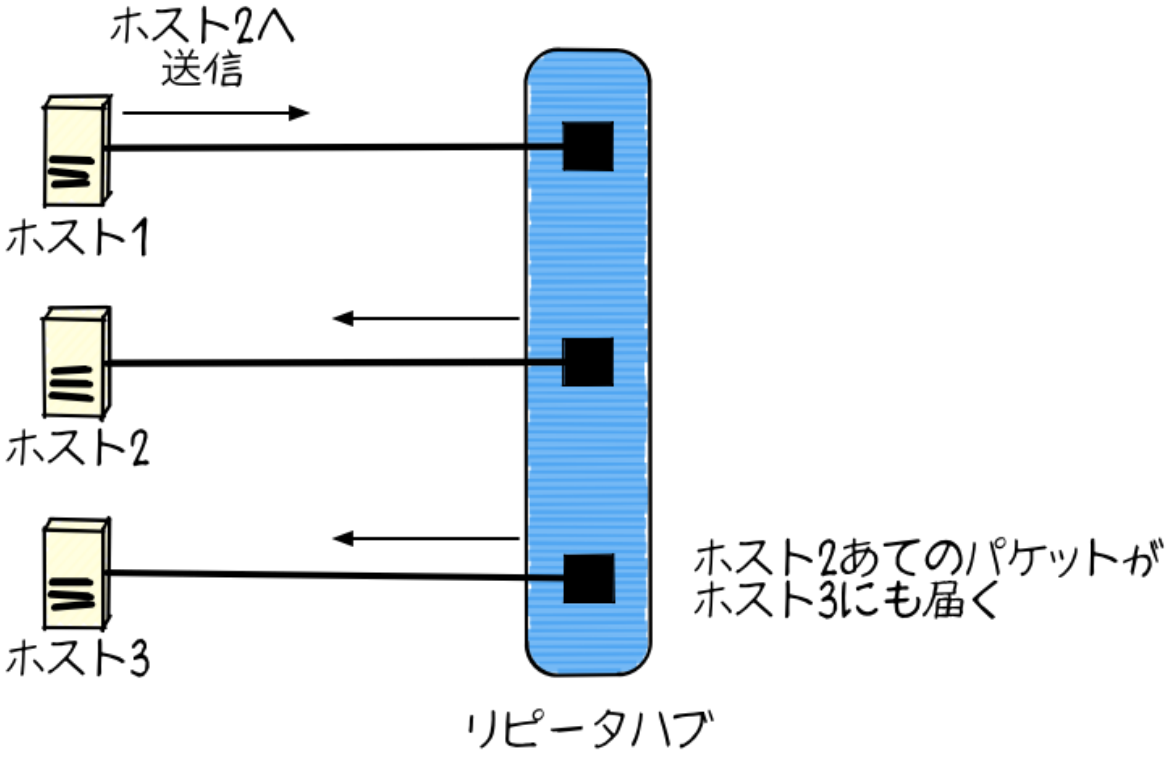
#####################

> ##########################################2###########

> ##########################################################
> ###################  (###############)#####################
> ##############################3##########################
> ######

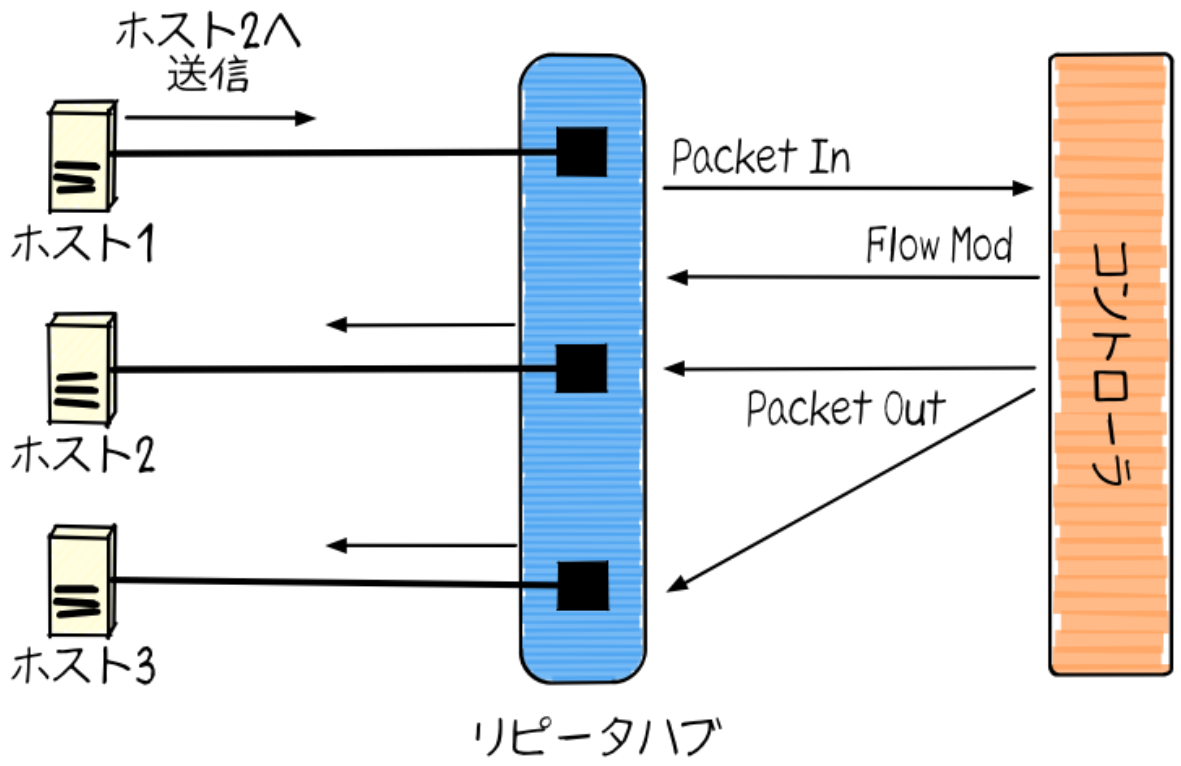
## 9.2. #########

#################################### 3 ####### 9#1################### 1 ####
# 2 ################################################################ 3 #### 2 #
################################### (# 7 ###################) #### ### ########
##############################################




### ###### 9.1. ### 3 ###############

### ######## ####### 9#2############ 1 ######################## ###### ## #####
################################### (#######)#### #### ### ############### ## #
####### 1 ############### ###### ### ############




###### 9.2. ######## #######

## 9.3. ###########

##########################################################################
##############################################

#################### #############.### ##################### [1] ############

> ##############################################################
> ## (######################################)####################
> ###### (######################)##############

#### ## ##### ######### ##### ########## ####### # (######) ####### ######## ####
# [2] #############

> ##############################################################
> ##############################################################

2#################

- #########################

[1] ####://#############.###/#########/153234/###########################
[2] #####://############.###/#####/3159####################

- ###########################

##########################################

1. ### 1#### 2#### 3 ##########
2. ####################
3. ### 1 #### 2 ##########
4. ### 2#### 3 ##########

###########################

## 9.4. #########

############## 3 ###########

########[3]
    ########################################
#####[4]
    ##########################################
#####/########_####_###########[5]
    ##########################################################

## 9.5. ############

############ ######## ####################################

1. ### 1#### 2#### 3 ##########
2. ####################
3. ### 1 #### 2 ##########
4. ### 2#### 3 ##########

######## ######## ##################################(####)#####(#####)#####(### #)#3########

[3] #####://########.##
[4] #####://######.###/########/#####
[5] #####://######.###/#####/########_####_###########

- #####: ### 1#### 2#### 3 ##############################
- ####: ### 1 #### 2 ##########
- ####: ### 2#### 3 ###########

######### ##### ##### ######## ##########

### 9.5.1. #####: ###################

######### (#####) ######################### 3 ########## (# 9#1) ############### ######## `features/repeater_hub.feature` #######:

```
Given a file named "trema.conf" with:
  """
  vswitch('repeater_hub') { datapath_id 0xabc }

  vhost('host1') {
    ip '192.168.0.1'
    promisc true
  }
  vhost('host2') {
    ip '192.168.0.2'
    promisc true
  }
  vhost('host3') {
    ip '192.168.0.3'
    promisc true
  }

  link 'repeater_hub', 'host1'
  link 'repeater_hub', 'host2'
  link 'repeater_hub', 'host3'
  """
```

#### `Given a file named "trema.conf" with: …` ###… ########## `trema.conf` ########## ######################### #### (####) ################

########### `promisc` ##### (##################################) # `true` ######## ######################################################################

########################### ##### ###############

```
And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration "trema.conf"
```

##########################

```
$ ./bin/trema run lib/repeater_hub.rb -c trema.conf -d
```

##### ################### `lib/repeater_hub.rb` ############################## ###################################### `features/repeater_hub.feature` ########### #####

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
Feature: Repeater Hub example
  @sudo @announce-
  Scenario: Run
    Given a file named "trema.conf" with:
      """
      vswitch('repeater_hub') { datapath_id 0xabc }

      vhost('host1') {
        ip '192.168.0.1'
        promisc true
      }
      vhost('host2') {
        ip '192.168.0.2'
        promisc true
      }
      vhost('host3') {
        ip '192.168.0.3'
        promisc true
      }

      link 'repeater_hub', 'host1'
      link 'repeater_hub', 'host2'
      link 'repeater_hub', 'host3'
      """
<<-STDERR
/home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/lib/trema/command.rb:40:in `load': cannot load such
 file -- ../../lib/repeater_hub.rb (LoadError)
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/lib/trema/command.rb:40:in `run'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/bin/trema:54:in `block (2 levels) in
 <module:App>'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/command_support.rb:126:in `call'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/command_support.rb:126:in `execute'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/app_support.rb:296:in `block in
 call_command'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/app_support.rb:309:in `call'
```

```
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/app_support.rb:309:in `call_command'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/gli-2.13.2/lib/gli/app_support.rb:83:in `run'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/bin/trema:252:in `<module:App>'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/bin/trema:14:in `<module:Trema>'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/gems/trema-0.7.1/bin/trema:12:in `<top (required)>'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/bin/trema:23:in `load'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/bin/trema:23:in `<main>'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/bin/ruby_executable_hooks:15:in `eval'
        from /home/yasuhito/.rvm/gems/ruby-2.2.0/bin/ruby_executable_hooks:15:in `<main>'

STDERR
    And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration "trema.conf"
      expected "trema run ../../lib/repeater_hub.rb -c trema.conf -d" to be successfully executed
 (RSpec::Expectations::ExpectationNotMetError)
      ./features/step_definitions/trema_steps.rb:41:in `/^I trema run "([^"]*)"( interactively)? with the
 configuration "([^"]*)"$/'
      features/repeater_hub.feature:27:in `And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration
 "trema.conf"'

Failing Scenarios:
cucumber features/repeater_hub.feature:5 # Scenario: Run as a daemon

1 scenario (1 failed)
3 steps (1 failed, 1 skipped, 1 passed)
0m8.113s
```

##### trema run ########################## lib/repeater_hub.rb ################## ############################

```
$ mkdir lib
$ touch lib/repeater_hub.rb
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
```

################################

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
(##)
<<-STDERR
error: No controller class is defined.

STDERR
    And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration "trema.conf" # features/step_definitions/
trema_steps.rb:30
```

```
    expected "trema run ../../lib/repeater_hub.rb -c trema.conf -d" to be successfully executed
(RSpec::Expectations::ExpectationNotMetError)
    ./features/step_definitions/trema_steps.rb:41:in `/^I trema run "([^"]*)"( interactively)? with the
configuration "([^"]*)"$/'
    features/repeater_hub.feature:27:in `And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration
"trema.conf"'
```

########_###.## ######################################### `RepeaterHub` ####### ####################################

###/########_###.##

```
class RepeaterHub < Trema::Controller
end
```

############################

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
(##)
1 scenario (1 passed)
3 steps (3 passed)
0m18.207s
```

#####! ### ##### ############

################################################################################################################

## 9.5.2. ####: #######

#### ###################################### ######## ####1 ## ####2 ########## ######################### ####_####### ######### ################## `I run …` ## ######

```
When I run `trema send_packets --source host1 --dest host2`
```

############################

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
(##)
1 scenario (1 passed)
4 steps (4 passed)
```

```
0m21.910s
```

################ #### ######

## 9.5.3. ####: ##########

#### ################################## 2#### 3 ############################ ##### `trema/cucumber_step_definitions` ##############

```
Then the number of packets received by "host2" should be:
  |      source | #packets |
  | 192.168.0.1 |        1 |
And the number of packets received by "host3" should be:
  |      source | #packets |
  | 192.168.0.1 |        1 |
```

###################### 2#### 3 ############ ## #### 192.168.0.1 ####### 1 ######## #############

##############

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
(##)
    When I run `trema send_packets --source host1 --dest host2`
<<-STDERR

STDERR
    Then the number of packets received by "host2" should be:
      | source      | #packets |
      | 192.168.0.1 | 1        |

      expected: 1
           got: 0

      (compared using ==)
       (RSpec::Expectations::ExpectationNotMetError)
      ./features/step_definitions/show_stats_steps.rb:52:in `block (2 levels) in <top (required)>'
      ./features/step_definitions/show_stats_steps.rb:50:in `each'
      ./features/step_definitions/show_stats_steps.rb:50:in `/^the number of packets received by "(.*?)" should be:
$/'
      features/repeater_hub.feature:30:in `Then the number of packets received by "host2" should be:'
    And the number of packets received by "host3" should be:
      | source      | #packets |
      | 192.168.0.1 | 1        |
```

```
Failing Scenarios:
cucumber features/repeater_hub.feature:5 # Scenario: Run as a daemon

1 scenario (1 failed)
6 steps (1 failed, 1 skipped, 4 passed)
0m20.198s
```

####2 # 1 ############################ RepeaterHub ########################

########## #### ### ######### RepeaterHub ######################

```
class RepeaterHub < Trema::Controller
  def packet_in(datapath_id, packet_in)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      match: ExactMatch.new(packet_in),
      actions: SendOutPort.new(:flood)
    )
  end
end
```

```
$ ./bin/cucumber features/repeater_hub.feature
(##)
    Then the number of packets received by "host2" should be:
      | source      | #packets |
      | 192.168.0.1 | 1        |

      expected: 1
           got: 0
```

############# ####2 ########################## ########################## ###### ### ######################### ###### ### #######

```
class RepeaterHub < Trema::Controller
  def packet_in(datapath_id, packet_in)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      match: ExactMatch.new(packet_in),
      actions: SendOutPort.new(:flood)
    )
    send_packet_out(
      datapath_id,
```

```
      raw_data: packet_in.raw_data,
      actions: SendOutPort.new(:flood)
    )
  end
end
```

############

```
$ bundle exec cucumber features/repeater_hub.feature
Rack is disabled
Feature: "Repeater Hub" example

  @sudo
  Scenario: Run as a daemon
    Given a file named "trema.conf" with:
      """
      vswitch('repeater_hub') { datapath_id 0xabc }

      vhost('host1') {
        ip '192.168.0.1'
        promisc true
      }
      vhost('host2') {
        ip '192.168.0.2'
        promisc true
      }
      vhost('host3') {
        ip '192.168.0.3'
        promisc true
      }

      link 'repeater_hub', 'host1'
      link 'repeater_hub', 'host2'
      link 'repeater_hub', 'host3'
      """
    And I trema run "lib/repeater_hub.rb" with the configuration "trema.conf"
    When I run `trema send_packets --source host1 --dest host2`
    Then the number of packets received by "host2" should be:
      | source      | #packets |
      | 192.168.0.1 | 1        |
    And the number of packets received by "host3" should be:
      | source      | #packets |
      | 192.168.0.1 | 1        |

1 scenario (1 passed)
```

```
6 steps (6 passed)
0m20.976s
```

#############! ##################################

## 9.6. ########

#######################################################################
##################################### 4 ####

####[6]

    ##########################################

####[7]

    ############ (##################) ################

####[8]

    ##################################

#######[9]

    ######## #### ############################

RepeaterHub ################## 4 ################

```
$ ./bin/reek lib/repeater_hub.rb

$ ./bin/flog lib/repeater_hub.rb
    9.0: flog total
    4.5: flog/method average

    5.6: RepeaterHub#packet_in          lib/repeater_hub.rb:7

$ ./bin/flay lib/repeater_hub.rb
Total score (lower is better) = 0

$ ./bin/rubocop lib/repeater_hub.rb
Inspecting 1 file
.
```

[6] #####://######.###/#########/####
[7] ####://####.####.##/####.####
[8] ####://####.####.##/####.####
[9] #####://######.###/#######/#######

```
1 file inspected, no offenses detected
```

reek # flog # flay # rubocop ############################ flog ##################
#########################################10############################

#################################################################
#################################################################

#########################!

## 9.7. ###

#################################################################2####

- ####################/########_####_#####################################
  ##########
- ####################3#################################################
  #################
- ######################## reek # flog # flay # rubocop #########################

########################### ( features/ ##) ##################################

## 9.8. ####

- ###########(#### ###################)
  ################################################################
  ###############
- ##########(###### #####################)
  ################################################################
  ####################################(#######################
  ############ ############# ########### ####################)######

# ####### 10. ##########################

#########!##################################################

## 10.1. #############

#######################################################################
#######################################

#######################################################################
#######################################################################
##############################

#######################################################################
#######################################################################
#####################################################

## 10.2. ###############

##############################.....#########################################
####################.....###################.....#

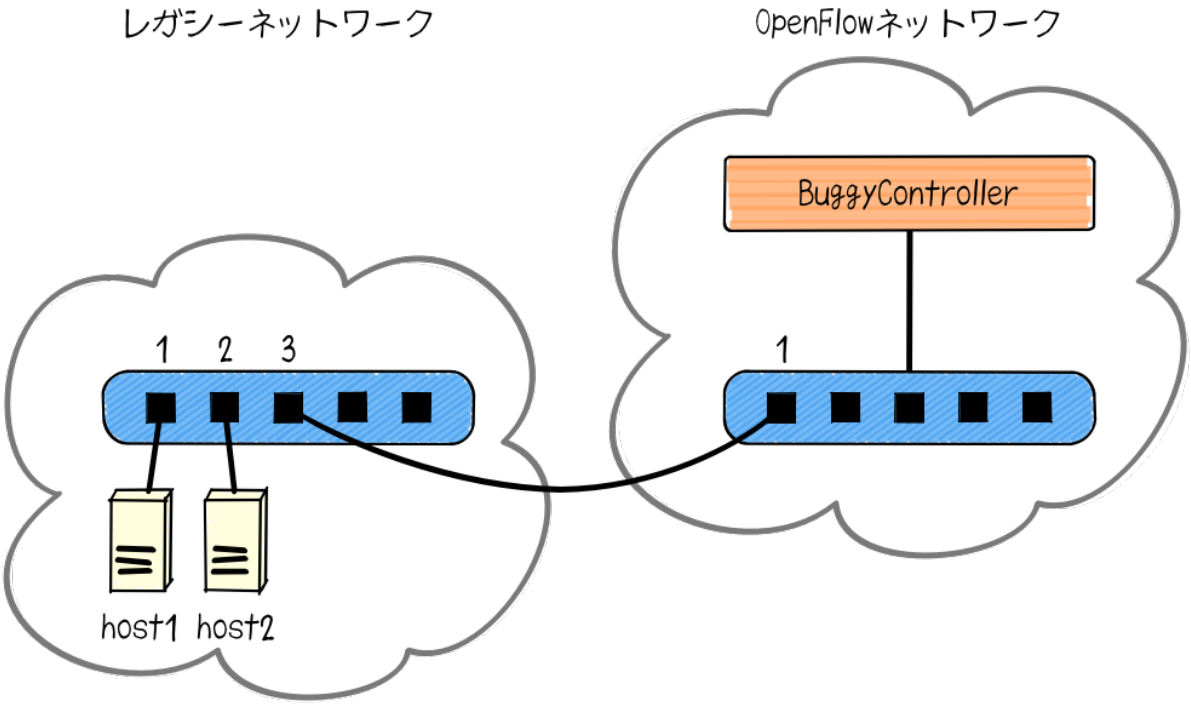
##########################################################################
##########################################################################
##########################################################################
########

######################

## 10.3. #######

##########################################################################
#########################!#################################################
##################################

##########################################################################
##10#1#########




### ###### 10.1. ##########################

##################################2################3##################1###
#######################################################(###################
#)##########

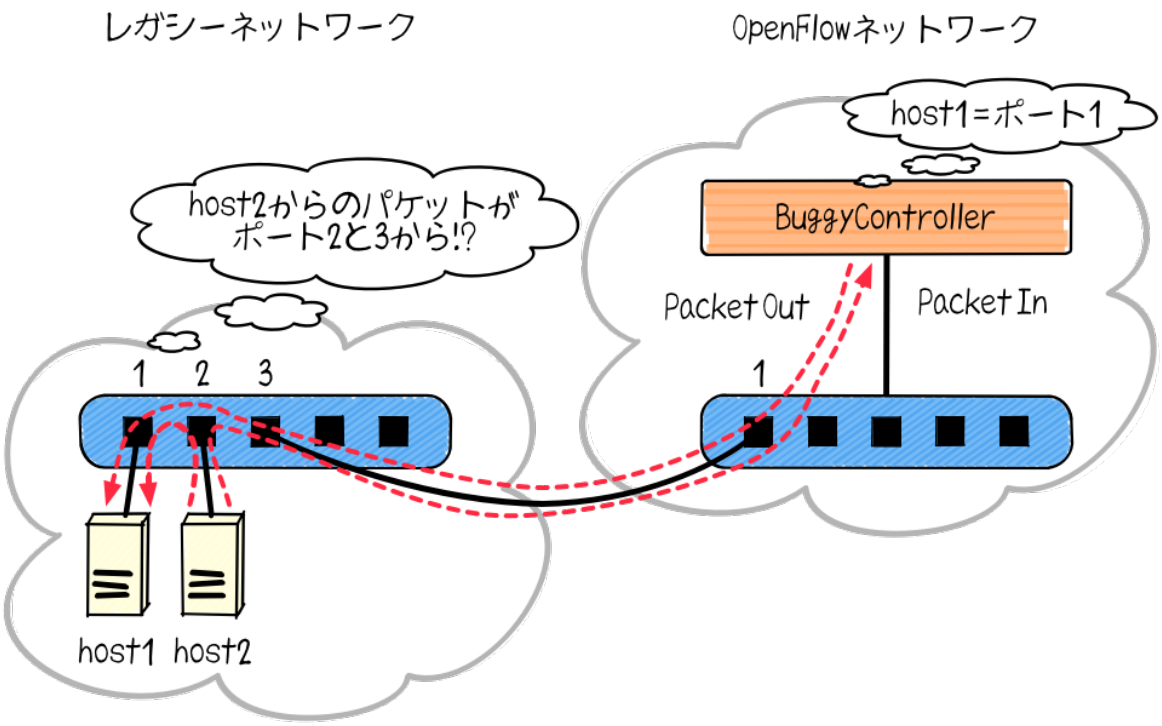
### 10.3.1. ######### ################

#################################################################
################

#### ###########1#################################################################
#################################################################################
##

### 10.3.2. #######

#######10#2##########################




### ###### 10.2. ######################

1. ####1#####2##########
2. ################################1########## ############################1#
   #####1#############
3. ################### ####1 ############## [1]

[1] ########################################### ####### ###########################

4. ####2#####1##########
5. ######################1##########1####### ################1############ ########1####################1######## #####
6. #########1####2#3##########################################2########2##3 #################

#######################################################################

### 10.3.3. ###############

############2#######

1#######################################################################################################1#########################  #########
###### ################################ assert ##############################(#9####### ##########)#################################################

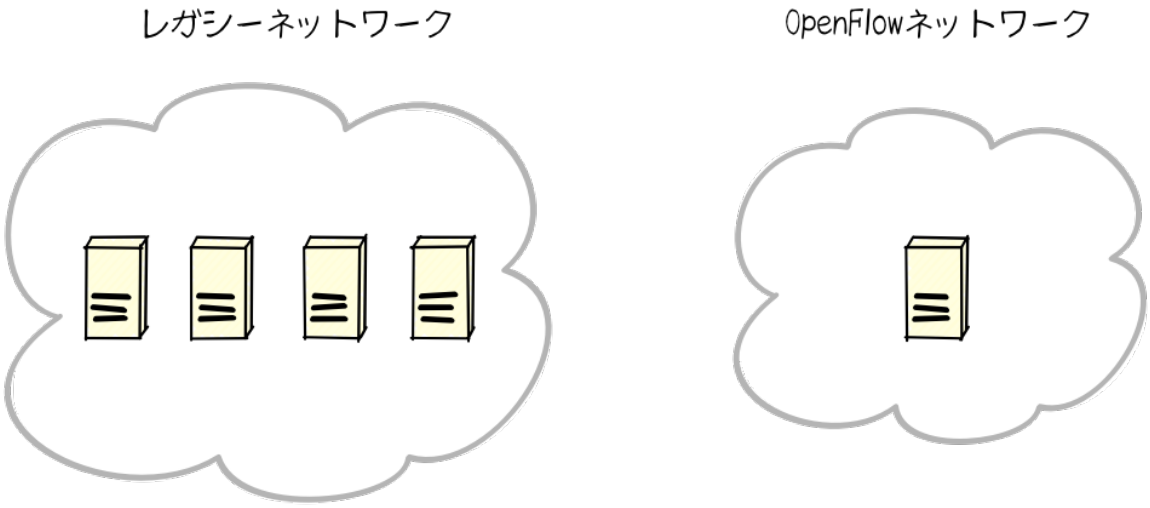
#########################################

## 10.4. ################

#################################################################
####################3#################################################

### 10.4.1. ############

#######################################################################(#10#3)#######################################



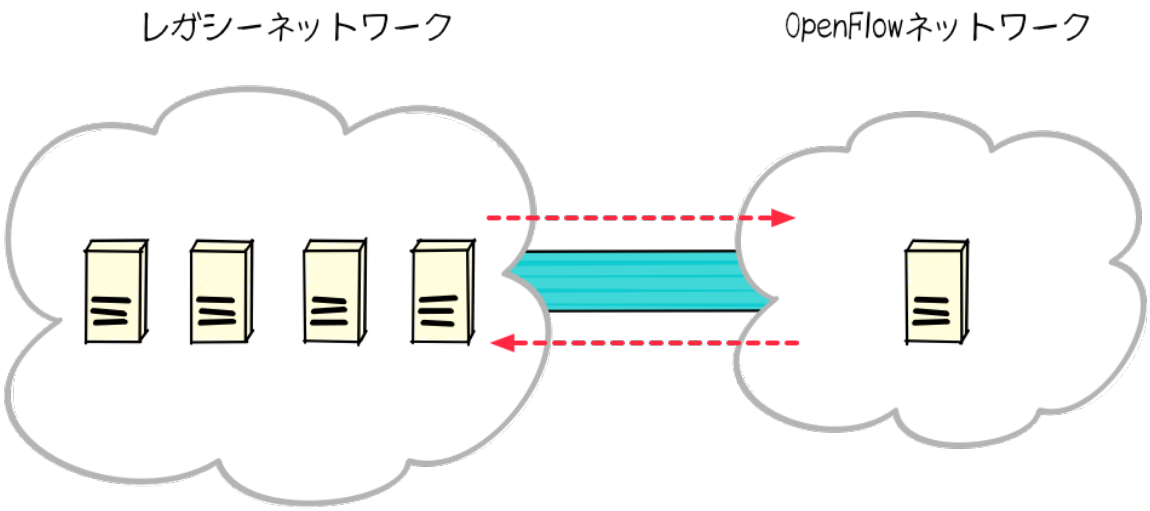

### ###### 10.3. ##########################################

#######################################################

#######################################################################
#######################################################################
##############################################

## 10.4.2. ##########

#############################################################10#4##



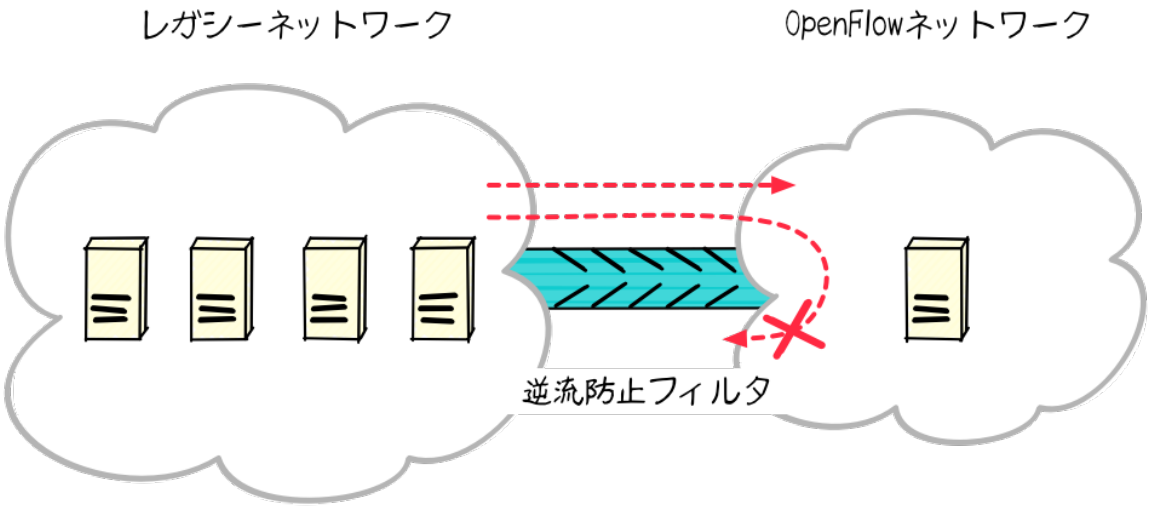

### ###### 10.4. ##################################

##########################################################################
########

##########################################################################
##########################################################################
#######################################################

## 10.4.3. #############

##################2################2#################################
#######################################10#5##




## ###### 10.5. ####################################

##########################→######## ####################################
##################

#################################################################
####################2#################################################
####

## 10.5. ########

##########################################################################
##############################################

#########1######## ######2################1###########################1#####
#############1##############################################

## 10.5.1. ######

#################### ############### ###### # #####/###_###_###### ##### (#####://######.###/#####/###_###_######) #############

```
$ git clone https://github.com/trema/one_way_bridge.git
```

################ bundle install --binstubs ####################################

```
$ cd one_way_bridge
$ bundle install --binstubs
```

################ ## # #### ####### #########################

### /### _### _######.##

```
# Safety-net controller bridging legacy and OpenFlow networks.
class OneWayBridge < Trema::Controller
  def packet_in(datapath_id, packet_in)
    out_port = { 1 => 2, 2 => 1 }.fetch(packet_in.in_port)
    add_flow datapath_id, packet_in.source_mac, packet_in.in_port, out_port
    send_packet datapath_id, packet_in, out_port
    add_drop_flow datapath_id, packet_in.source_mac, out_port
  end

  def flow_removed(datapath_id, packet_in)
    delete_flow datapath_id, packet_in.match.source_mac_address
  end

  private

  def add_flow(datapath_id, source_mac, in_port, out_port)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
      idle_timeout: 10 * 60,
      match: Match.new(in_port: in_port, source_mac_address: source_mac),
      actions: SendOutPort.new(out_port)
    )
  end

  def add_drop_flow(datapath_id, source_mac, in_port)
    send_flow_mod_add(
      datapath_id,
```

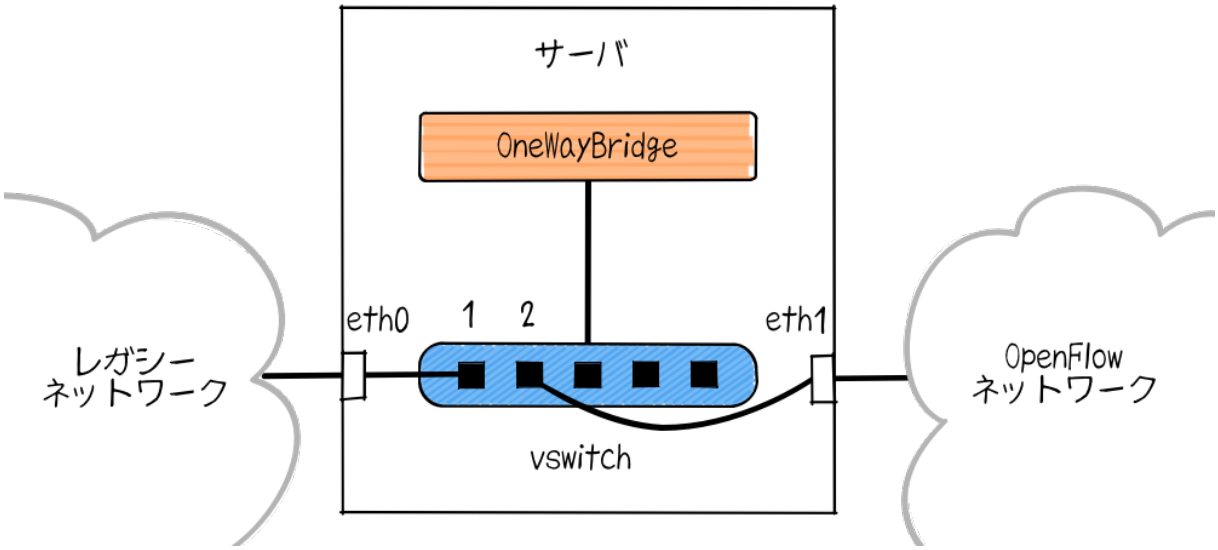
```
      idle_timeout: 10 * 60,
      match: Match.new(in_port: in_port, source_mac_address: source_mac)
    )
  end

  def send_packet(datapath_id, packet_in, out_port)
    send_packet_out(
      datapath_id,
      packet_in: packet_in,
      actions: SendOutPort.new(out_port)
    )
  end

  def delete_flow(datapath_id, source_mac)
    send_flow_mod_delete(
      datapath_id,
      match: Match.new(source_mac_address: source_mac)
    )
  end
end
```

packet_in ############# ######################################## add_flow ### ######### ################## send_packet ################################### ############### add_drop_flow ########################################

flow_removed ################################################### :source_mac_address ################### delete_flow ######################### ##

## 10.5.2. #######

#################################################################
#######################################################################
############2#################################(#######)####################
(#10#6##




### ###### 10.6. ##########################################

################################## link ######################0####1#######
###########

#### ##################################

```
vswitch ('bridge') {
  datapath_id 0xabc
}

link 'bridge', 'eth0'
link 'bridge', 'eth1'
```

################ trema run # -c ###########

```
$ ./bin/trema run ./lib/one-way-bridge.rb -c ./trema.conf
```

## 10.5.3. ########

#################################################5######100########
#######################################################################
#######################################################################
##############################

## 10.6. ###

########################################

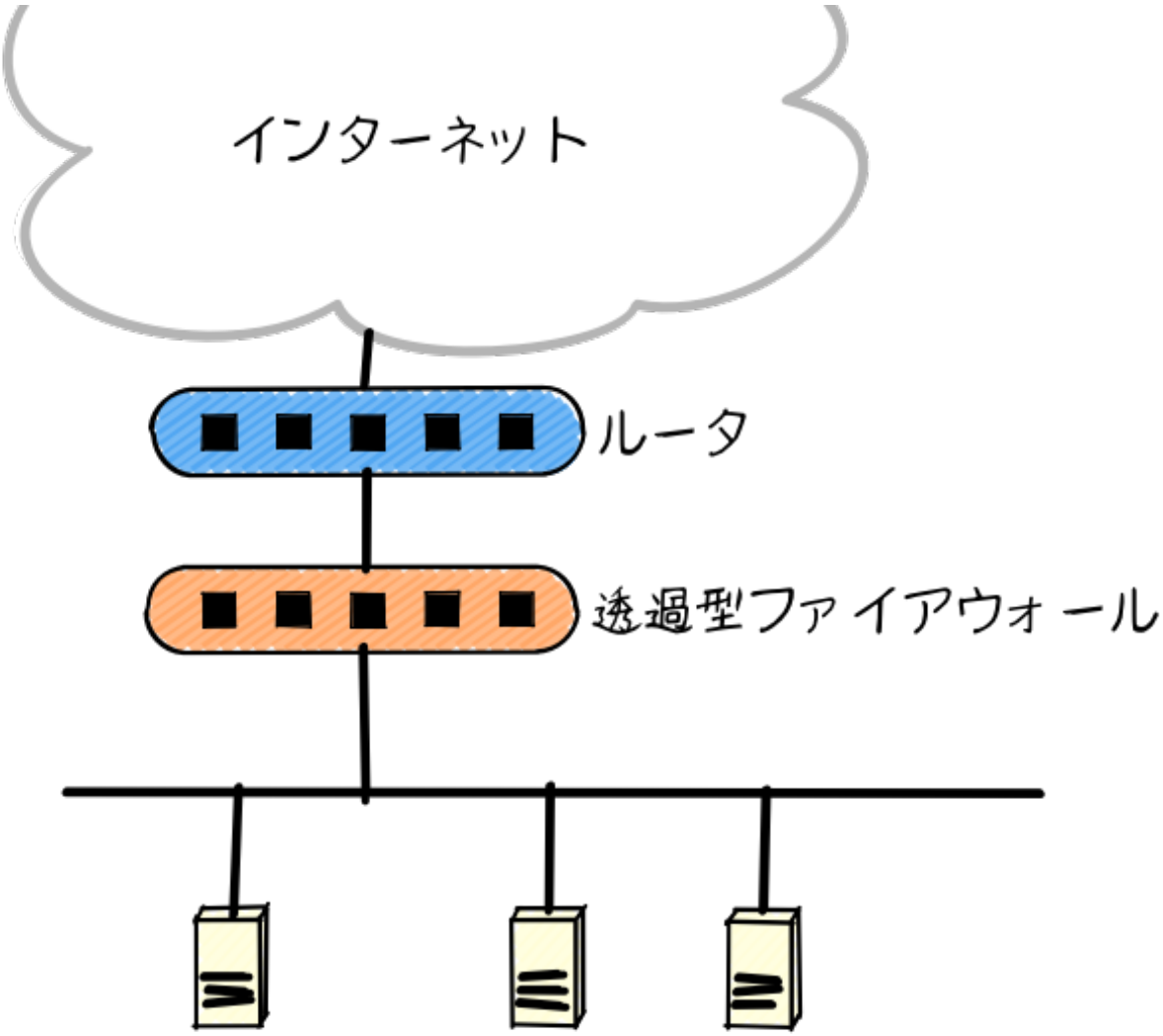
- ##########################################################################
  ####################
- ################################2##############################

# ####### 11. ########

################################################################
######## #############

## 11.1. ###########

################################### 11#1 ####################################
#######################################################




###### 11.1. ###########

################4#############################2##################

########1918

###1918#################################################################
###

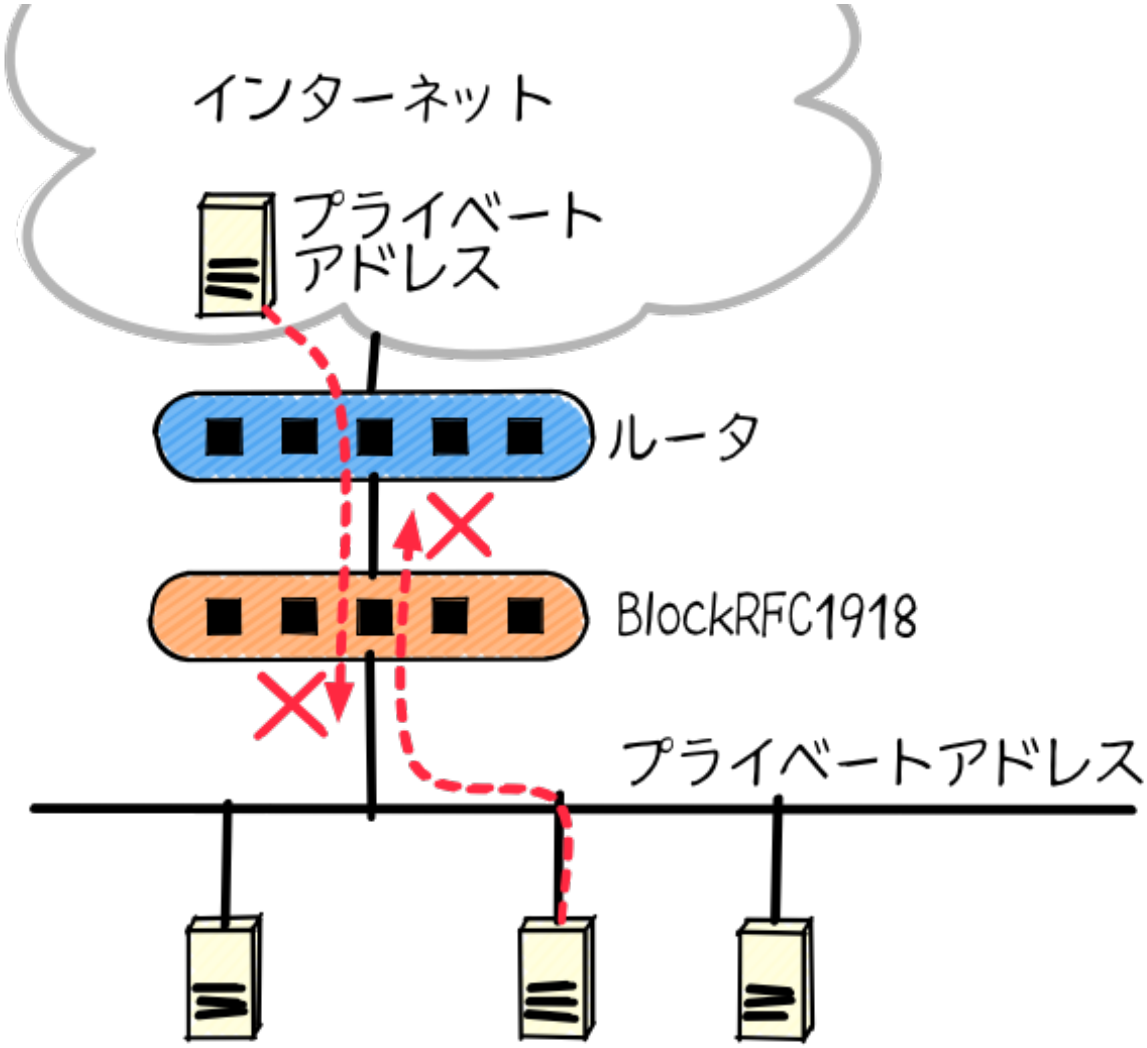
#############

################################→#################

## 11.2. ########1918######

########1918############### ## ######################### (# 11#2)############
###1918 (##############) ####### 3 ## ## #########

- 10.0.0.0/8
- 172.16.0.0/12
- 192.168.0.0/16




## ###### 11.2. ########1918##############################

### 11.2.1. #######

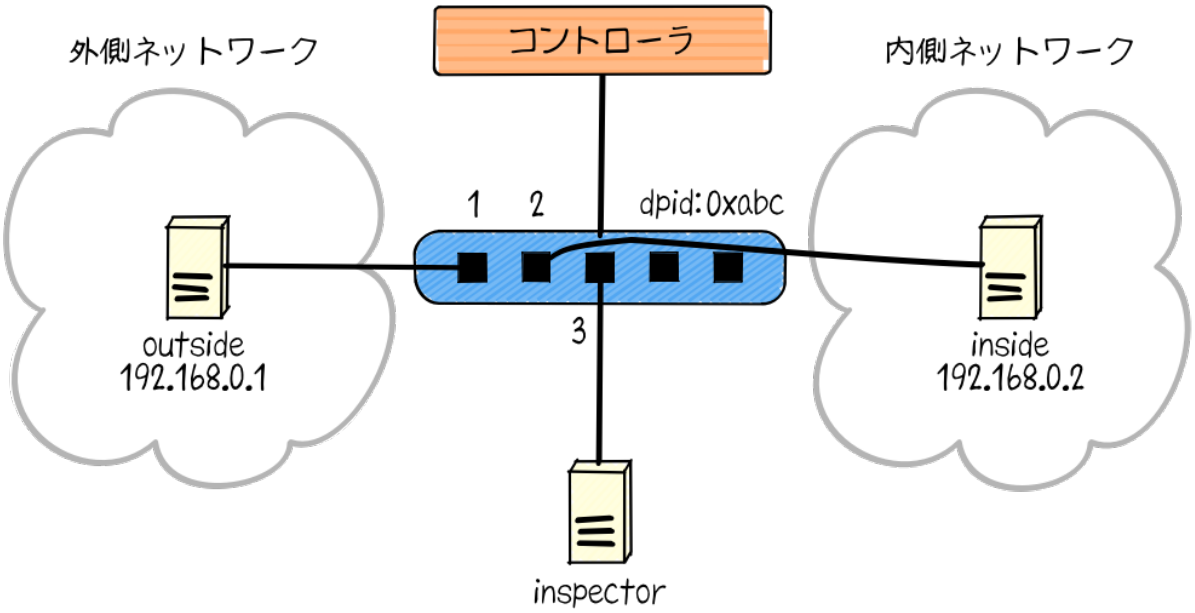
############### ########1918 ##################################### ###### # trema/transparent_firewall ##### (#####://######.###/#####/###########_########) ### ##########

```
$ git clone https://github.com/trema/transparent_firewall.git
```

################ bundle install --binstubs ####################################

```
$ cd transparent_firewall
$ bundle install --binstubs
```

###### ######################1#######3############ trema.conf ####### (#11#3)#




## ###### 11.3. ########1918 ##################

#####.####

```
vswitch('firewall') { datapath_id '0xabc' }

vhost('outside') { ip '192.168.0.1' }
vhost('inside') { ip '192.168.0.2' }
vhost('inspector') {
  ip '192.168.0.3'
  promisc true
}

link 'firewall', 'outside'
link 'firewall', 'inside'
link 'firewall', 'inspector'
```

### ####### ###################################### ###### ################ ### ######### # ########1918 ########################################### # ####### ### ###### ############## promisc ################################### ####

########## trema run # -c ################## ########1918 ################

```
$ ./bin/trema run ./lib/block_rfc1918.rb -c trema.conf
0xabc: connected
0xabc: loading finished
```

########## trema send_packets ######## ####### # ###### ####################

```
$ ./bin/trema send_packets --source outside --dest inside
$ ./bin/trema send_packets --source inside --dest outside
```

####### # ###### ##############################1918 ############################
## ######### ##########

trema show_stats ##### ############## ### ######### ####################

```
$ ./bin/trema show_stats outside
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats inside
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats inspector
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
```

############ # ###### # show_stats ## Packets received: ########################
############## 2 ###### ######### ########

## 11.2.2. ########

########1918#############################################################

###/#####_###1918.##

```
# A sample transparent firewall
class BlockRFC1918 < Trema::Controller
  PORT = {
    outside: 1,
    inside: 2,
    inspect: 3
  }

  PREFIX = ['10.0.0.0/8', '172.16.0.0/12', '192.168.0.0/16'].map do |each|
```

```
  IPv4Address.new each
end

def switch_ready(dpid)
  if @dpid
    logger.info "#{dpid.to_hex}: ignored"
    return
  end
  @dpid = dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: connected"
  start_loading
end

def switch_disconnected(dpid)
  return if @dpid != dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: disconnected"
  @dpid = nil
end

def barrier_reply(dpid, _message)
  return if dpid != @dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: loading finished"
end

private

def start_loading
  PREFIX.each do |each|
    block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :inside, priority: 5000
    block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :outside, priority: 4000
  end
  install_postamble 1500
  send_message @dpid, Barrier::Request.new
end

def block_prefix_on_port(prefix:, in_port:, priority:)
  send_flow_mod_add(
    @dpid,
    priority: priority + 100,
    match: Match.new(in_port: PORT[in_port],
                     ether_type: 0x0800,
                     source_ip_address: prefix),
    actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
  send_flow_mod_add(
    @dpid,
    priority: priority,
```

```
      match: Match.new(in_port: PORT[in_port],
                       ether_type: 0x0800,
                       destination_ip_address: prefix),
      actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
    end

    def install_postamble(priority)
      send_flow_mod_add(
        @dpid,
        priority: priority + 100,
        match: Match.new(in_port: PORT[:inside]),
        actions: SendOutPort.new(PORT[:outside]))
      send_flow_mod_add(
        @dpid,
        priority: priority,
        match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
        actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
    end
  end
```

################## switch_ready ########### switch_ref ################## start_loading ##########

########1918#######_##### (###/#####_###1918.##)

```
  def switch_ready(dpid)
    if @dpid
      logger.info "#{dpid.to_hex}: ignored"
      return
    end
    @dpid = dpid
    logger.info "#{@dpid.to_hex}: connected"
    start_loading ❶
  end
```

❶ ############ start_loading ######## start_loading ##########################################1918 ##### 3 ######## ######################## ## ##################### inspector ################ block_prefix_on_port ###########

########1918######_#######, ########1918######_######_##_#### (###/#####_###1918.##)

```
  def start_loading
    PREFIX.each do |each|
```

```
    block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :outside, priority: 4000 ❶
    block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :inside, priority: 5000 ❷
  end
  install_postamble 1500
  send_message @dpid, Barrier::Request.new
end

def block_prefix_on_port(prefix:, in_port:, priority:)
  send_flow_mod_add( ❸
    @dpid,
    priority: priority + 100,
    match: Match.new(in_port: PORT[in_port],
                     ether_type: 0x0800,
                     source_ip_address: prefix),
    actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
  send_flow_mod_add( ❹
    @dpid,
    priority: priority,
    match: Match.new(in_port: PORT[in_port],
                     ether_type: 0x0800,
                     destination_ip_address: prefix),
    actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
end
```

❶ ######## 1 # (###########) ####################

❷ ######## 2 # (###########) ####################

❸ ### ## ##################### inspector ##################

❹ ## ## ##################### inspector ##################

####### ## ######################################### install_postamble #######
#########

########1918########_######### (###/#####_###1918.##)

```
def install_postamble(priority)
  send_flow_mod_add( ❶
    @dpid,
    priority: priority + 100,
    match: Match.new(in_port: PORT[:inside]),
    actions: SendOutPort.new(PORT[:outside]))
  send_flow_mod_add( ❷
    @dpid,
    priority: priority,
    match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
    actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
```

```
  end
```

❶ ######## 2 # (########) ####### ## ######### 1 # (########) ###

❷ ########## 1 ######## ## ######### 2 ####

############################################ `Barrier::Request` ################ `Barrier::Reply` ###### `barrier_reply` ############################

########1918########_##### (###/#####_###1918.##)

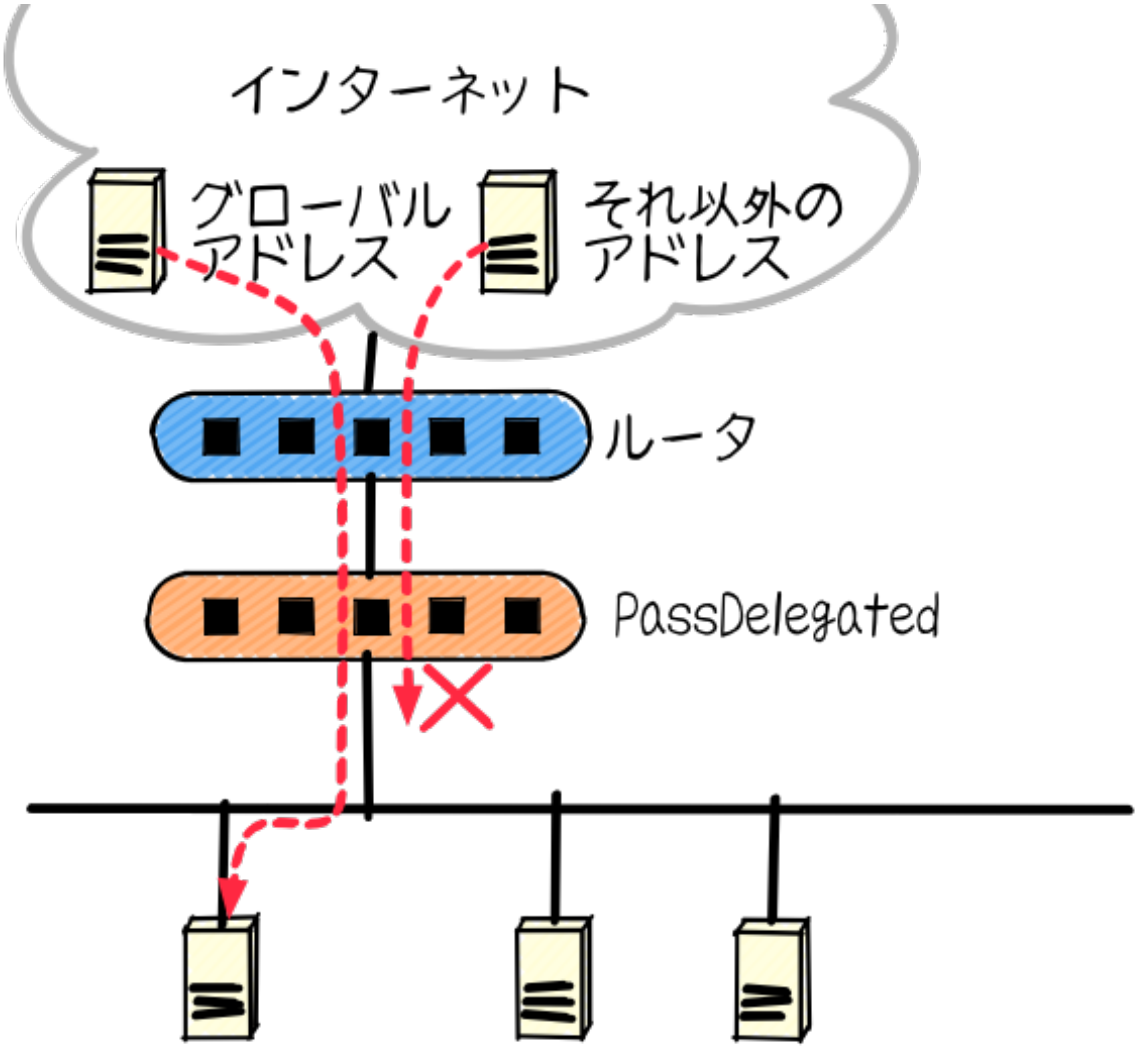
```
  def barrier_reply(dpid, _message) ❶
    return if dpid != @dpid
    logger.info "#{@dpid.to_hex}: loading finished"
  end

  private

  def start_loading
    PREFIX.each do |each|
      block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :outside, priority: 4000
      block_prefix_on_port prefix: each, in_port: :inside, priority: 5000
    end
    install_postamble 1500
    send_message @dpid, Barrier::Request.new ❷
  end
```

❷ ##### `Barrier::Request` ##############################

❶ `Barrier::Reply` ############ `logger.info` ###

## 11.3. ####################

############################################ ## ########## ## ############ ### (# 11#4)#




## ###### 11.4. ##########################→##########################

################ ## ####### trema/transparent_firewall ############ ## ########### # ( *.txt ####) ################################################################ ############################ ############ ####### ########### ###### (#####) ### ######## 3000 ### ## #############

### ############################.###

```
1.0.0.0/8
14.0.0.0/16
14.1.0.0/20
14.1.16.0/21
14.1.32.0/19
14.1.64.0/19
14.1.128.0/17
14.2.0.0/15
14.4.0.0/14
```

```
14.8.0.0/13
...
```

## 11.3.1. #######

############ ######## 11#3### `trema.conf` ########## `trema run` ############### # #.### ######### ## ########################## ## ##########2################ ################

```
$ ./bin/trema run ./lib/pass_delegated.rb -c pass_delegated.conf
aggregated-delegated-afrinic.txt: 713 prefixes
aggregated-delegated-apnic.txt: 3440 prefixes
aggregated-delegated-arin.txt: 11342 prefixes
aggregated-delegated-lacnic.txt: 1937 prefixes
aggregated-delegated-ripencc.txt: 7329 prefixes
0xabc: connected
0xabc: loading started
0xabc: loading finished in 241.03 seconds
```

###################### `trema send_packets` ################################### ####

```
$ ./bin/trema send_packets --source outside --dest inside
$ ./bin/trema send_packets --source inside --dest outside
```

############# ################################################################ ################################################################## ################### `trema show_stats` ##### ############## ### ######### ######## #############

```
$ ./bin/trema show_stats outside
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats inside
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats inspector
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
```

############ ## ###### ############### ###### ## ####### ################ ######### ############# ######### ########

## 11.3.2. ########

############# ######## ########1918 ################################ 4 ######## ########

##### (###: 64000)

##############  ## ##################################3 ######################### ######

##### (###: 65000)

#######################################⇔################

##### (###: 1000)

##############  ## ############## ######### #################

###4### (###: 900)

########### ###4 ################################

### /#### _#########.##

```
# A sample transparent firewall
class PassDelegated < Trema::Controller
  PORT = {
    outside: 1,
    inside: 2,
    inspect: 3
  }

  PRIORITY = {
    bypass: 65_000,
    prefix: 64_000,
    inspect: 1000,
    non_ipv4: 900
  }

  PREFIX_FILES = %w(afrinic apnic arin lacnic ripencc).map do |each|
    "aggregated-delegated-#{each}.txt"
  end

  def start(_args)
    @prefixes = PREFIX_FILES.reduce([]) do |result, each|
      data = IO.readlines(File.join __dir__, '..', each)
      logger.info "#{each}: #{data.size} prefixes"
      result + data
```

```
  end
end

def switch_ready(dpid)
  if @dpid
    logger.info "#{dpid.to_hex}: ignored"
    return
  end
  @dpid = dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: connected"
  start_loading
end

def switch_disconnected(dpid)
  return if @dpid != dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: disconnected"
  @dpid = nil
end

def barrier_reply(dpid, _message)
  return if dpid != @dpid
  finish_loading
end

private

def start_loading
  @loading_started = Time.now
  install_preamble_and_bypass
  install_prefixes
  install_postamble
  send_message @dpid, Barrier::Request.new
end

# All flows in place, safe to remove bypass.
def finish_loading
  send_flow_mod_delete(@dpid,
                       strict: true,
                       priority: PRIORITY[:bypass],
                       match: Match.new(in_port: PORT[:outside]))
  logger.info(format('%s: loading finished in %.2f second(s)',
                     @dpid.to_hex, Time.now - @loading_started))
end

def install_preamble_and_bypass
  send_flow_mod_add(@dpid,
```

```
                priority: PRIORITY[:bypass],
                match: Match.new(in_port: PORT[:inside]),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:outside]))
  send_flow_mod_add(@dpid,
                priority: PRIORITY[:bypass],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
 end

 def install_prefixes
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: loading started"
  @prefixes.each do |each|
   send_flow_mod_add(@dpid,
                priority: PRIORITY[:prefix],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside],
                        ether_type: 0x0800,
                        source_ip_address: IPv4Address.new(each)),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
  end
 end

 # Deny any other IPv4 and permit non-IPv4 traffic.
 def install_postamble
  send_flow_mod_add(@dpid,
                priority: PRIORITY[:inspect],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside], ether_type: 0x0800),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
  send_flow_mod_add(@dpid,
                priority: PRIORITY[:non_ipv4],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
 end
end
```

########1918 ################## start_loading ############

##################_####### (###/####_#########.##)

```
def start_loading
 @loading_started = Time.now
 install_preamble_and_bypass
 install_prefixes
 install_postamble
 send_message @dpid, Barrier::Request.new
end
```

####### install_preamble_and_bypass ########⇔################################
#######################################################################
####################################

#####################_########_###_###### (###/####_#########.##)

```
def install_preamble_and_bypass
  send_flow_mod_add(@dpid, ❶
                    priority: PRIORITY[:bypass],
                    match: Match.new(in_port: PORT[:inside]),
                    actions: SendOutPort.new(PORT[:outside]))
  send_flow_mod_add(@dpid, ❷
                    priority: PRIORITY[:bypass],
                    match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
                    actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
end
```

❶ ##→#######################
❷ ##→#######################
################################################## ###########→############
############ ## ########## 1 #################

#####################_######## (###/####_#########.##)

```
def install_prefixes
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: loading started"
  @prefixes.each do |each|
    send_flow_mod_add(@dpid,
                      priority: PRIORITY[:prefix],
                      match: Match.new(in_port: PORT[:outside],
                                       ether_type: 0x0800,
                                       source_ip_address: IPv4Address.new(each)),
                      actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
  end
end
```

## install_postamble ############ ###4 #### 2 ################################
############ ## ############## ######### ##############4 #####################
# ###4 #########################

#####################_######### (###/####_#########.##)

```
# Deny any other IPv4 and permit non-IPv4 traffic.
def install_postamble
```

```
  send_flow_mod_add(@dpid, ❶
                priority: PRIORITY[:inspect],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside], ether_type: 0x0800),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inspect]))
  send_flow_mod_add(@dpid, ❷
                priority: PRIORITY[:non_ipv4],
                match: Match.new(in_port: PORT[:outside]),
                actions: SendOutPort.new(PORT[:inside]))
end
```

❶ ###############

❷ ###4 #############

##########################################→##############################
#→##################################################

#####################_######### (###/####_#########.##)

```
def barrier_reply(dpid, _message)
  return if dpid != @dpid
  finish_loading
end

private

# All flows in place, safe to remove bypass.
def finish_loading
  send_flow_mod_delete(@dpid,
                  strict: true,
                  priority: PRIORITY[:bypass],
                  match: Match.new(in_port: PORT[:outside]))
  logger.info(format('%s: loading finished in %.2f second(s)',
                @dpid.to_hex, Time.now - @loading_started))
end
```

## 11.4. ###

#####################2#####################

- ##################################################
- #### ### ################### `Barrier::Request` ########

#######################################################################
#################

# ####### 12. ### (##)

################################################################################

## 12.1. ###########

################################################ ### ############### ## ##############################################################################

### ############## ### ################################################################################ ### ################################################################################ ### ##################################

################################################################ 1 ##########

- ################################################################

- #### ###################### ### (##### ## ##### ########)##########
- ### ##### ### (############ ######## ####) ####################
- ################ #### (################# #### #########)#################### ###################

#################### ## (############) ########################### (#####) ## ######################################################## ## ############## ###################

## 12.2. ################

#################################################################

#################################################

###########
    ##################################################################
    ##########################################

#########
    ##### 1 ##################################################################
    ################

#########################################################################
################################################## 2 ###########

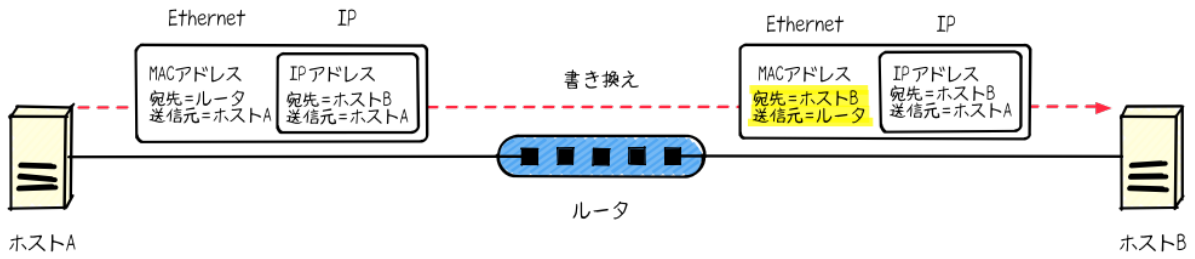
## 12.3. ######

#########################################################################
####1) ##################2) ###################### 2 ##########

### 12.3.1. ###############

# 12#1 #### # #### # ################### # ##### ## ######## #### ## ######## # # ## ##########

########## # ################################################ # ########## ### ######### ### ############### # # ### ####################################



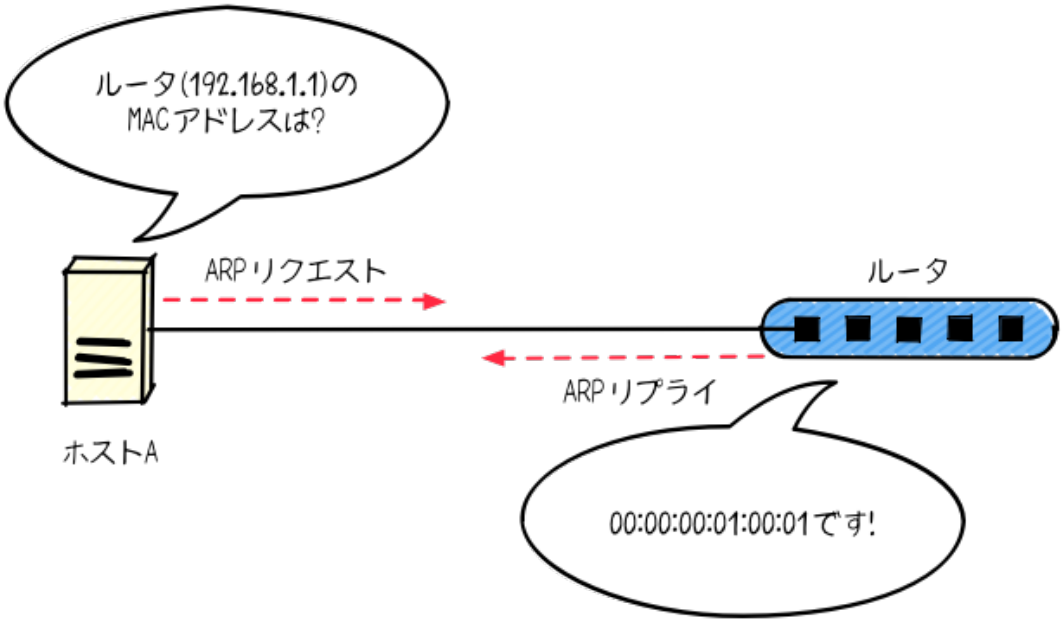

## ###### 12.1. ##########################################

################## # ########### ################################ # # ### ###### ######## ### ########################## # ########

##########################1 #############

### #### ### ########

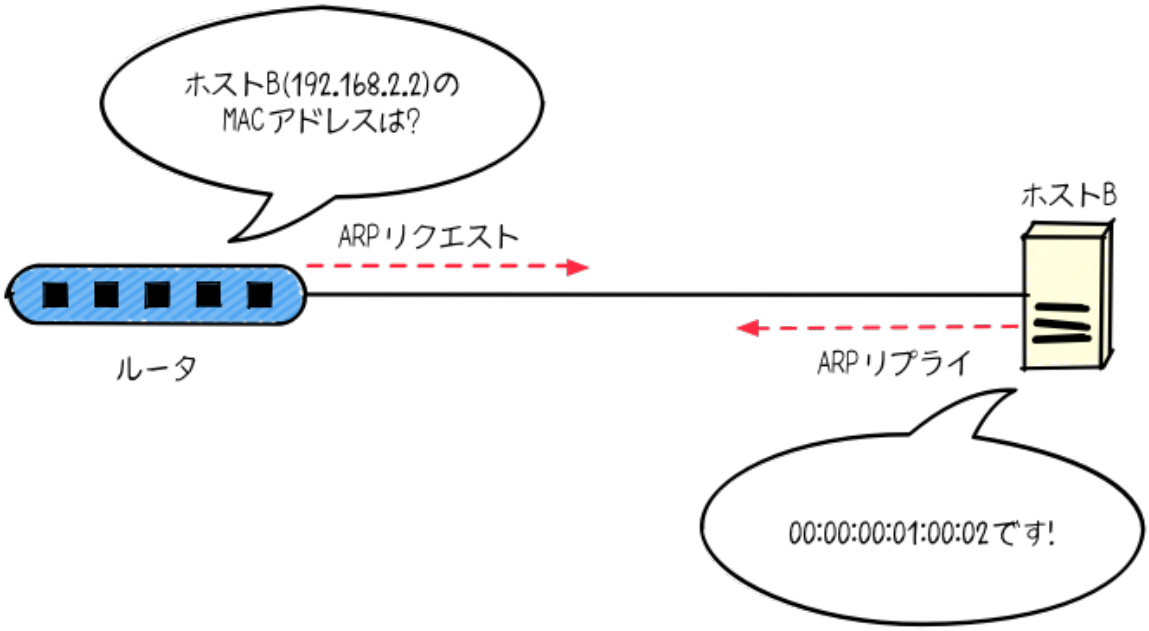
#########################  ###  ##########################################
###(####### ########## ########)#####################################2######
########## # ############### ### ##### ### ############## ### ################
#### ### ############### ### ##### ### ########### (# 12#2)#




## ###### 12.2. #### ### ########### ### ########

### ###### ### ########

############################ ### ################################ # # ### #### ####### ### ######### # ################### # # ### ############### ######## ### ################# (##:##:##:##:##:##) #######

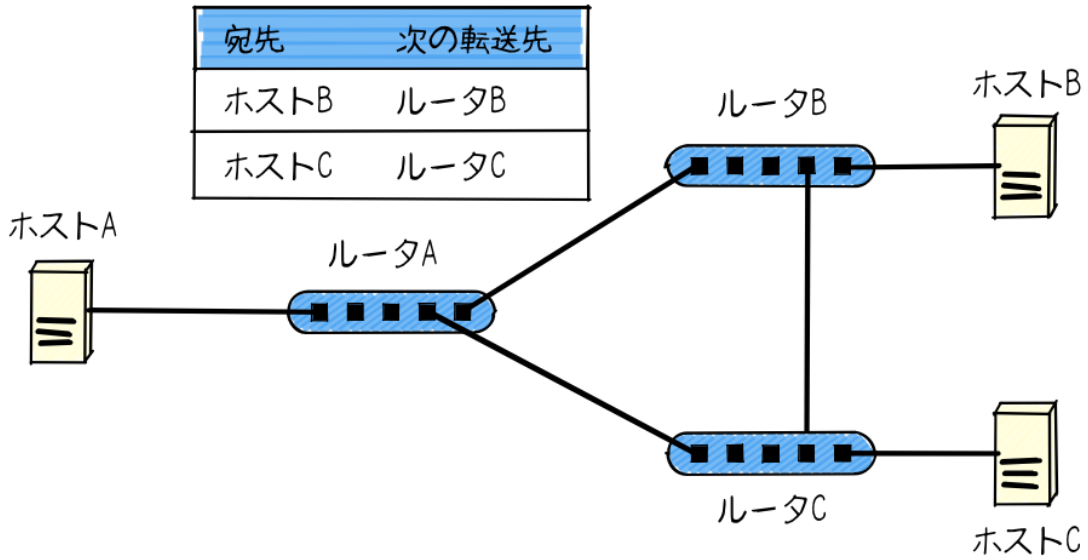

ホストB(192.168.2.2)の
MACアドレスは?
ARPリクエスト
ホストB
ルータ
ARPリプライ
00:00:00:01:00:02です!

### ###### 12.3. ###### ### ###########

### ####### ### ################### ### ######################################### ############ ### #################

## 12.3.2. ##################

############################## (# 12#4)######### # #### # ################ # ##### ############################ # #### # ######################## # ###### # ####### ###### # ########### # ########




### ###### 12.4. ##################

### # ################################### # ##### # ############### # ###### ##### # ########

################################################################## # ### ########### 12#4 ###########

#################################################################

## 12.4. ########

####### ( SimpleRouter ) ############################################ ( lib/simple_router.rb ) ############################### # trema/simple_router ##### (#####://######.###/#####/######_######) #############

```
$ git clone https://github.com/trema/simple_router.git
$ cd simple_router
$ bundle install --binstubs
```

### 12.4.1. ###### ## ####

############# ###### ## ################ packet_in #################

#### ##################_## (###/######_######.##)

```
def packet_in(dpid, packet_in)
  return unless sent_to_router?(packet_in)
```

```
  case packet_in.data
  when Arp::Request
    packet_in_arp_request dpid, packet_in.in_port, packet_in.data
  when Arp::Reply
    packet_in_arp_reply dpid, packet_in
  when Parser::IPv4Packet
    packet_in_ipv4 dpid, packet_in
  else
    logger.debug "Dropping unsupported packet type: #{packet_in.data.inspect}"
  end
end
```

## ###############

### ################################### ###### ## ############################ ######### ( sent_to_router? ####)#######################

#### ################_##_######? (###/######_######.##)

```
def sent_to_router?(packet_in)
  return true if packet_in.destination_mac.broadcast?
  interface = Interface.find_by(port_number: packet_in.in_port)
  interface && interface.mac_address == packet_in.destination_mac
end
```

## sent_to_router? ############ ### #### ( packet_in.destination_mac ) ######## ## ### ########################### ( packet_in.in_port ) ########## ### #### ( interface.mac_address ) ##################

## ##################

### ################################################## ############### ###4 ### ## 3 ##### PacketIn#data ##################################################

### ########## ### ############### packet_in_arp_request ################## ############# ###### ### # ### ###################

#### ##################_##_###_####### (###/######_######.##)

```
def packet_in_arp_request(dpid, in_port, arp_request)
  interface =
    Interface.find_by(port_number: in_port,
```

```
                ip_address: arp_request.target_protocol_address)
  return unless interface
  send_packet_out(
    dpid,
    raw_data: Arp::Reply.new(
      destination_mac: arp_request.source_mac,
      source_mac: interface.mac_address,
      sender_protocol_address: arp_request.target_protocol_address,
      target_protocol_address: arp_request.sender_protocol_address
    ).to_binary,
    actions: SendOutPort.new(in_port))
end
```

### #########

### ################## #### (`@arp_table`) # ### ############## `PacketIn#sender_protocol` ######## ### ######### ## ##############

#################_##_###_##### (###/######_######.##)

```
def packet_in_arp_reply(dpid, packet_in)
  @arp_table.update(packet_in.in_port,
                    packet_in.sender_protocol_address,
                    packet_in.source_mac)
  flush_unsent_packets(dpid,
                       packet_in.data,
                       Interface.find_by(port_number: packet_in.in_port))
end
```

#### `flush_unsent_packets` ####### ### ####################################

### #### #########

### 4 ########## `packet_in_ipv4` ################ ### 4 ######## 3 ############### #####

1. #############
2. ## ## #############
3. ######### (#######)

#################_##_### 4 (###/######_######.##)

```
def packet_in_ipv4(dpid, packet_in)
  if forward?(packet_in)
```

```
    forward(dpid, packet_in)
  elsif packet_in.ip_protocol == 1
    icmp = Icmp.read(packet_in.raw_data)
    packet_in_icmpv4_echo_request(dpid, packet_in) if icmp.icmp_type == 8
  else
    logger.debug "Dropping unsupported IPv4 packet: #{packet_in.data}"
  end
end
```

################# forward? ############################## ###4 ############### ####### ###4 #############

#####################? (###/######_######.##)

```
def forward?(packet_in)
  !Interface.find_by(ip_address: packet_in.destination_ip_address)
end
```

####### ## ######################################## #### ##### (####) ######### ######## packet_in_icmpv4_echo_request ########## #### #### ############

###################_##_#####4_####_####### (###/######_######.##)

```
def packet_in_icmpv4_echo_request(dpid, packet_in)
  icmp_request = Icmp.read(packet_in.raw_data)
  if @arp_table.lookup(packet_in.source_ip_address)
    send_packet_out(dpid,
                    raw_data: create_icmp_reply(icmp_request).to_binary,
                    actions: SendOutPort.new(packet_in.in_port))
  else
    send_later(dpid,
               interface: Interface.find_by(port_number: packet_in.in_port),
               destination_ip: packet_in.source_ip_address,
               data: create_icmp_reply(icmp_request))
  end
end
```

##### ## #### ( packet_in.source_ip_address ) ##### ### ##### ### ############## ##### ############## create_icmp_reply ################## ### ########## ############# ####### send_later ##### ### ################################

## 12.4.2. ###############

############################

### ################### (###/######_######.##)

```
def forward(dpid, packet_in)
  next_hop = resolve_next_hop(packet_in.destination_ip_address)

  interface = Interface.find_by_prefix(next_hop)
  return if !interface || (interface.port_number == packet_in.in_port)

  arp_entry = @arp_table.lookup(next_hop)
  if arp_entry
    actions = [SetSourceMacAddress.new(interface.mac_address),
               SetDestinationMacAddress.new(arp_entry.mac_address),
               SendOutPort.new(interface.port_number)]
    send_flow_mod_add(dpid,
                      match: ExactMatch.new(packet_in), actions: actions)
    send_packet_out(dpid, raw_data: packet_in.raw_data, actions: actions)
  else
    send_later(dpid,
               interface: interface,
               destination_ip: next_hop,
               data: packet_in.data)
  end
end
```

## `forward` ######## 5 ##########

1. ######################## ( `resolve_next_hop` )
2. ######################### ( `Interface.find_by_prefix` )
3. ################### ######## ### ####### ( `@arp_table.lookup` )
4. ### ##################################### ###### ### ##
5. ### ################ `send_later` ###########

######### 1 # 4 ######1 ########## `resolve_next_hop` ########################## 4 ################

## ############# (#### ### # ###### ###)

### ######### ### ################################################################ ############ 12#1 ######################## ### ############ `forward` ######## `actions` ###################### ### ######################################### ##### #### ### # ###### ### ##############

```
actions = [SetSourceMacAddress.new(interface.mac_address),
```

```
        SetDestinationMacAddress.new(arp_entry.mac_address),
        SendOutPort.new(interface.port_number)]
send_flow_mod_add(dpid,
            match: ExactMatch.new(packet_in), actions: actions)
send_packet_out(dpid, raw_data: packet_in.raw_data, actions: actions)
```

## 12.4.3. ### ##############

### ######################################## ################## send_later ### ######## #### #### ####### ### ##### ### ##################### send_later ###### #########

#################_##_#####4_####_####### (###/######_######.##)

```
def packet_in_icmpv4_echo_request(dpid, packet_in)
  icmp_request = Icmp.read(packet_in.raw_data)
  if @arp_table.lookup(packet_in.source_ip_address)
    send_packet_out(dpid,
                raw_data: create_icmp_reply(icmp_request).to_binary,
                actions: SendOutPort.new(packet_in.in_port))
  else
    send_later(dpid,
            interface: Interface.find_by(port_number: packet_in.in_port),
            destination_ip: packet_in.source_ip_address,
            data: create_icmp_reply(icmp_request))
  end
end
```

send_later ##### data: ########### ### ############################## interface: ########### ## ##### destination_ip: ################

send_later ########## ############ ## ########## ( queue ) ############### ### ### ########### ### ###########

#################_##### (###/######_######.##)

```
def send_later(dpid, options)
  destination_ip = options.fetch(:destination_ip)
  @unresolved_packet_queue[destination_ip] += [options.fetch(:data)]
  send_arp_request(dpid, destination_ip, options.fetch(:interface))
end
```

################## ### ##### ###### ## ########## packet_in_arp_reply ########### flush_unsent_packets ###########

##################_######_####### (###/######_######.##)

```
def flush_unsent_packets(dpid, arp_reply, interface)
  destination_ip = arp_reply.sender_protocol_address
  @unresolved_packet_queue[destination_ip].each do |each|
    rewrite_mac =
      [SetDestinationMacAddress.new(arp_reply.sender_hardware_address),
       SetSourceMacAddress.new(interface.mac_address),
       SendOutPort.new(interface.port_number)]
    send_packet_out(dpid, raw_data: each.to_binary_s, actions: rewrite_mac)
  end
  @unresolved_packet_queue[destination_ip] = []
end
```

#### ### ############################ ### ################### ###### ### ######

## 12.5. ###

########################################

- ################# ## ################################################ ### ## ########
- ###### ### ################ ### ############ ### ########################## ############## ### ##############
- ####################################################
- ###### ## ########## ####### #### ######################## ###########

### 13 ##########################################################

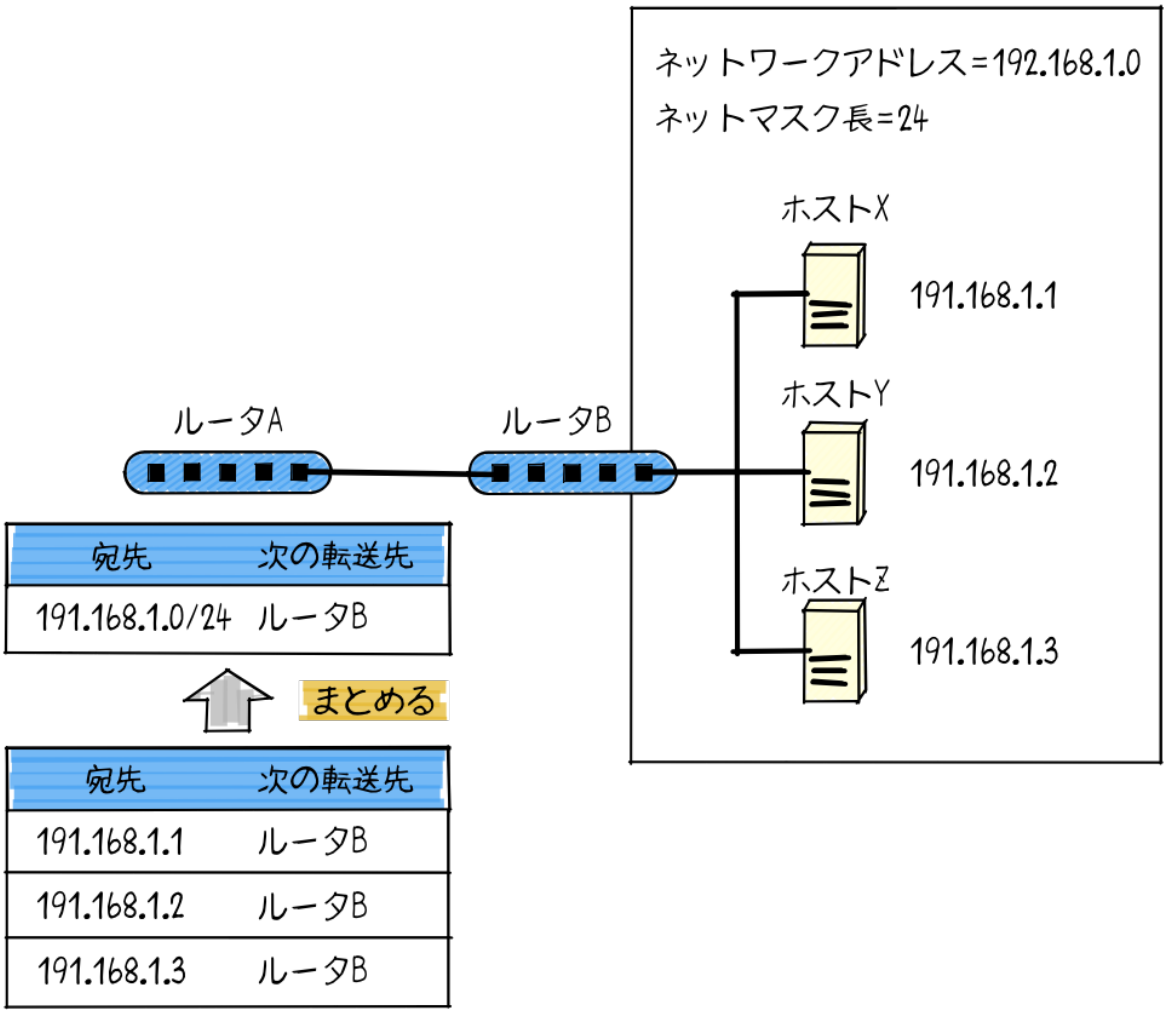
# ####### 13. ### (##)

##########################################################

## 13.1. ##########

##########################################################1#################
#######################################################################
#################################2016#####10#################################
##########

#######################################################################
#################################################################




## ###### 13.1. ##########################

##########################13#1#######################192.168.1.0#########24
##(###192.168.1.0/24######)#################,#,#################24#############
##########192.168.1.1####################,#,####1######192.168.1.0/24###########

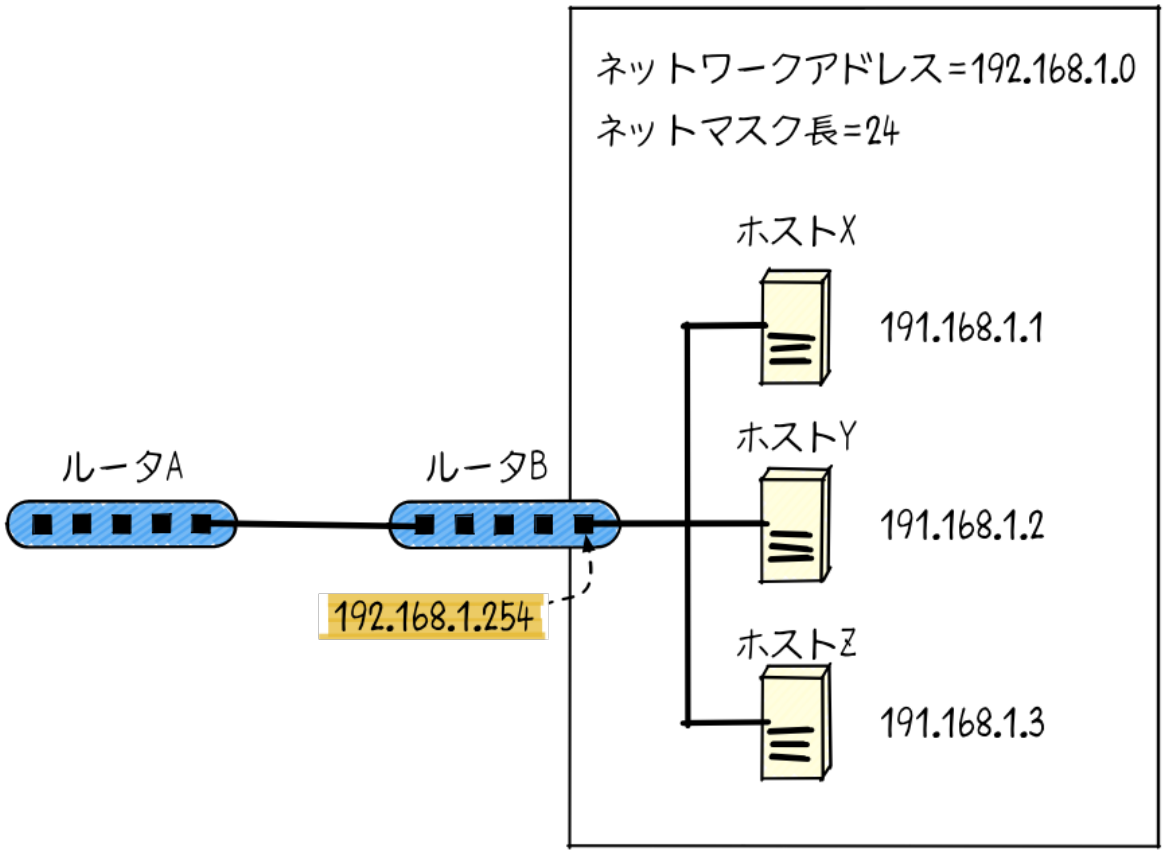
##################################13#1##################,#,#########
192.168.1.0/24####################1############

#########(192.168.1.1)##########################################192.168.1.0/24
#########192.168.1.1####24#################################################
##,####################1#####3##############

### 13.1.1. #########################

#13#1 ##########################################/####################

################################## ## ######################## ## ########### ################### ## ##########13#2 ##### # ############### #, #, # ######### ################ 192.168.1.254 ########

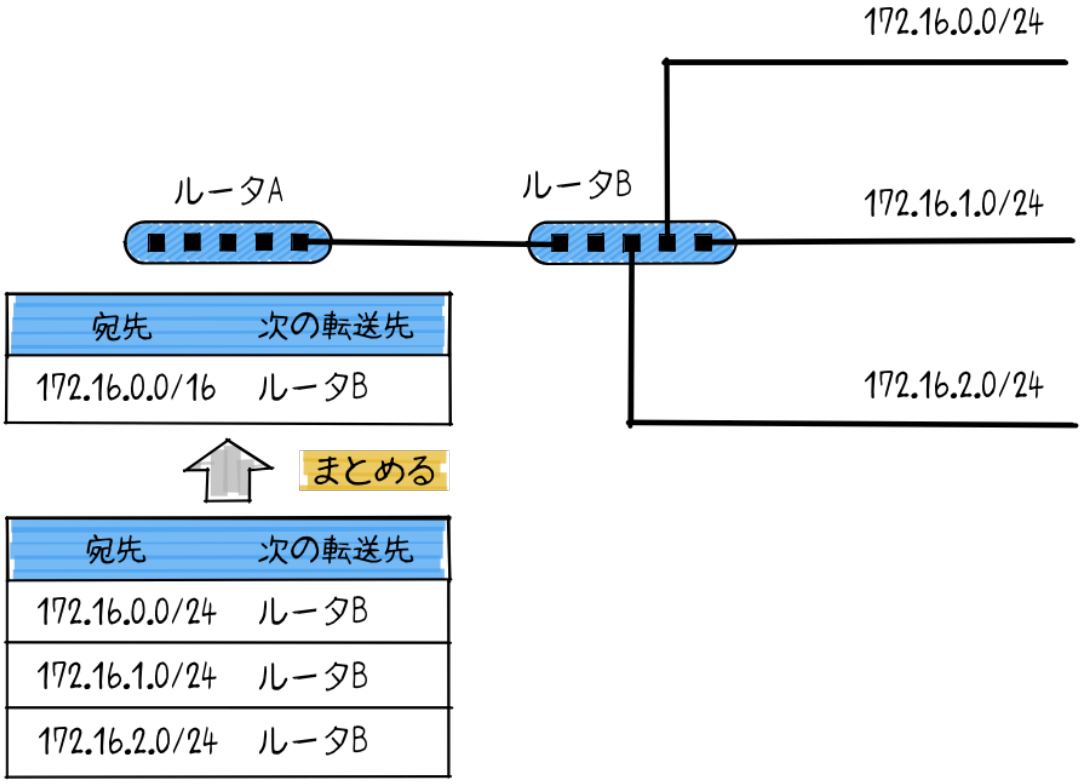



## ###### 13.2. ############################################## ## ### #######

### #13#2 #### # ##### # (192.168.1.1) ######################### # ############### ####################################192.168.1.254 ########################### ##################### ######## ### ################ # #############

## 13.2. ##################

##########################################

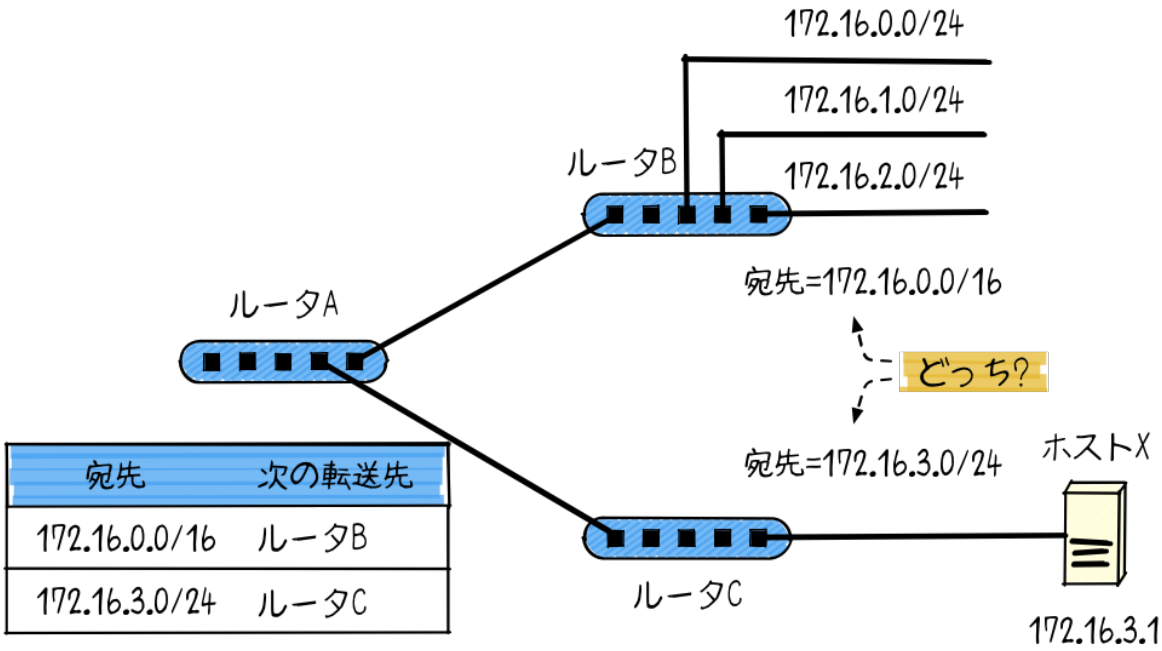



## ###### 13.3. ##########################

###### 13#3#3#############################3################16####172.16.0.0#
###################3#####################################3################
###172.16.0.0/16####1##########

### 13.2.1. 1####################

####### ## ##############################13#4 #### # #### # (172.16.3.1) ########
################ # ################## # ##### 3 #######################13#4###
## 2 ################################ 172.16.3.1 ##############################
###########################

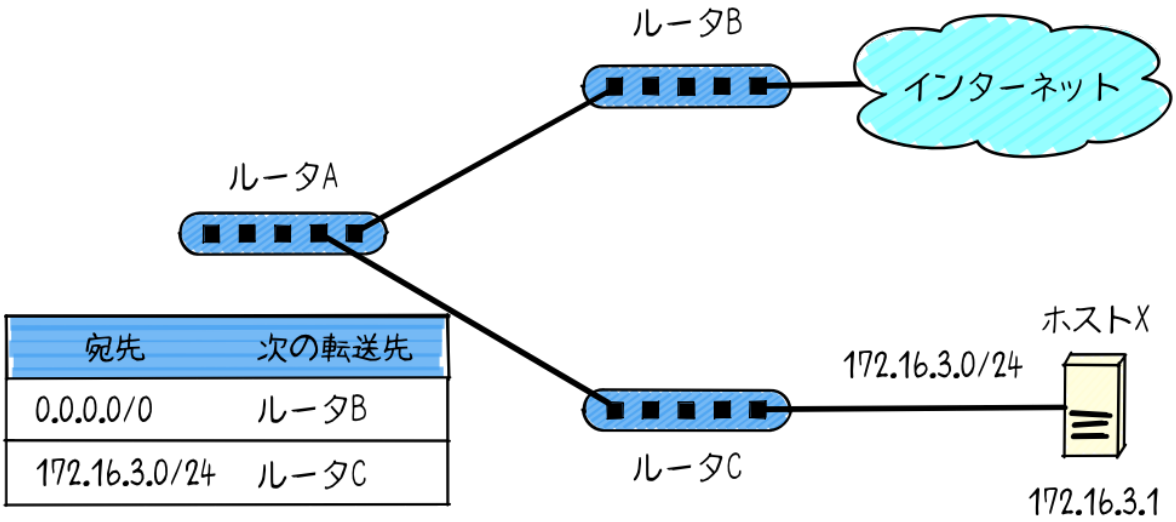



## ###### 13.4. ##################

#################################################################################################

### 13.2.2. ####################

#################################### 0.0.0.0/0 ################################################################################################################# 0 ######




### 13.5. 0.0.0.0/0

#13#5#####################################################################
#########################################13#5################1#########
############1##############################################

#13#5 ##################### (172.16.3.0/24) ##########################
##172.16.3.0/24 ########## # ######################## # ########################
############## # ####################

## 13.3. ############ #######

### 13.3.1. ##############(#)

RoutingTable ############################## forward ####################
########## 5 ####################################

#### (###/######_######.##)

```
def forward(dpid, packet_in)
  next_hop = resolve_next_hop(packet_in.destination_ip_address)

  interface = Interface.find_by_prefix(next_hop)
  return if !interface || (interface.port_number == packet_in.in_port)

  arp_entry = @arp_table.lookup(next_hop)
  if arp_entry
    actions = [SetSourceMacAddress.new(interface.mac_address),
```

```
            SetDestinationMacAddress.new(arp_entry.mac_address),
            SendOutPort.new(interface.port_number)]
    send_flow_mod_add(dpid,
                match: ExactMatch.new(packet_in), actions: actions)
    send_packet_out(dpid, raw_data: packet_in.raw_data, actions: actions)
  else
    send_later(dpid,
            interface: interface,
            destination_ip: next_hop,
            data: packet_in.data)
  end
end
```

###### ( packet_in.destination_ip_address ) ############# resolve_next_hop ##########

```
#####################_####_### (###/######_######.##)
```

```
def resolve_next_hop(destination_ip_address)
  interface = Interface.find_by_prefix(destination_ip_address)
  if interface
    destination_ip_address
  else
    @routing_table.lookup(destination_ip_address)
  end
end
```

```
##########################################################################
#########################################
```

### ####### ##########################################

```
#################### (###/######_######.##)
```

```
interface = Interface.find_by_prefix(next_hop)
return if !interface || (interface.port_number == packet_in.in_port)
```

```
##########################################################################
#######################################
```

## 13.3.2. ########## ( RoutingTable ###) ###

##########################

```
###/#######_#####.##
```

```
# Routing table
class RoutingTable
  include Pio

  MAX_NETMASK_LENGTH = 32

  def initialize(route)
    @db = Array.new(MAX_NETMASK_LENGTH + 1) { Hash.new }
    route.each { |each| add(each) }
  end

  def add(options)
    netmask_length = options.fetch(:netmask_length)
    prefix = IPv4Address.new(options.fetch(:destination)).mask(netmask_length)
    @db[netmask_length][prefix.to_i] = IPv4Address.new(options.fetch(:next_hop))
  end

  def lookup(destination_ip_address)
    MAX_NETMASK_LENGTH.downto(0).each do |each|
      prefix = destination_ip_address.mask(each)
      entry = @db[each][prefix.to_i]
      return entry if entry
    end
    nil
  end
end
```

######## @db ###################### (0 # 32) ################################ #### ## ####################

############### lookup ##################### destination_ip_address ########## ## ##### @db ################################## (32…0) # @db ####### ## ###### #####

## 13.3.3. #####

################################################################ simple_router.conf #######

#### _ ######.####

```
# Simple router configuration
module Configuration
  INTERFACES = [
```

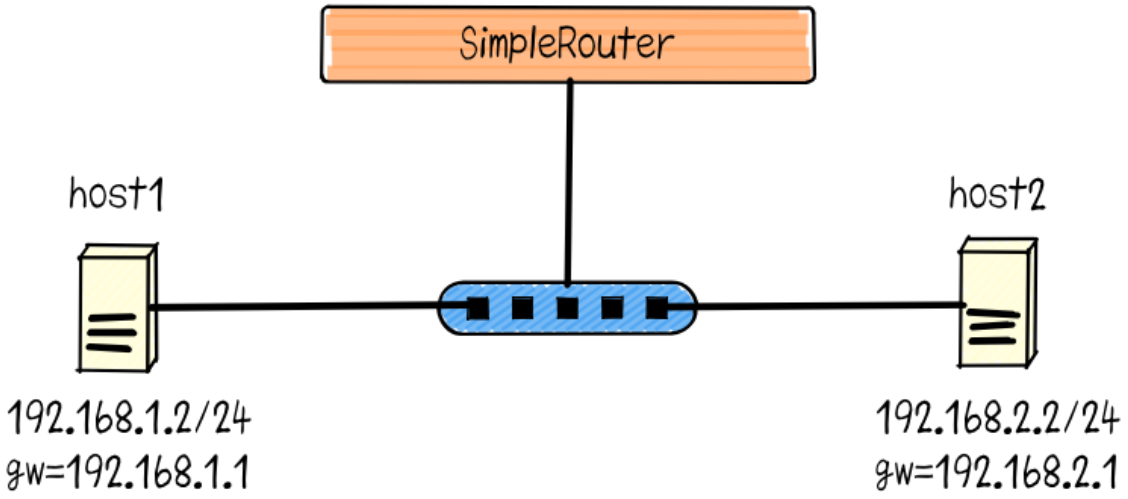
```
    {
      port: 1,
      mac_address: '01:01:01:01:01:01',
      ip_address: '192.168.1.1',
      netmask_length: 24
    },
    {
      port: 2,
      mac_address: '02:02:02:02:02:02',
      ip_address: '192.168.2.1',
      netmask_length: 24
    }
  ]

  ROUTES = [
    {
      destination: '0.0.0.0',
      netmask_length: 0,
      next_hop: '192.168.1.2'
    }
  ]
end
```

######################### ### #### ( :mac_address )### #### ( :ip_address )######## ( :netmask_length ) ############# ######## ########## ( :port ) ###############

################## ( :destination )######## ( :netmask_length ) ###### ( :next_hop ) ### ####

## 13.4. #######

#################################################################################################################################### # #### ################################################################################# ###### # ##### ##############################################




## ###### 13.6. ################

##### 13#6 #### ## ################### 2 ########################## vhost ####
# netns ################################################### netns ##########
route ########

#####.####

```
vswitch('0x1') { dpid 0x1 }
netns('host1') {
  ip '192.168.1.2'
  netmask '255.255.255.0'
  route net: '0.0.0.0', gateway: '192.168.1.1'
}
netns('host2') {
  ip '192.168.2.2'
  netmask '255.255.255.0'
  route net: '0.0.0.0', gateway: '192.168.2.1'
}
link '0x1', 'host1'
link '0x1', 'host2'
```

############ trema run # lib/simple_router.rb ######## 13#6#######################
##

```
$ ./bin/trema run ./lib/simple-router.rb -c ./trema.conf
```

################################ trema netns ########################### ####1
################

```
$ ./bin/trema netns host1
```

############## ####1 ########################

```
$ route -n
Kernel IP routing table
Destination     Gateway         Genmask         Flags Metric Ref    Use Iface
0.0.0.0         192.168.1.1     0.0.0.0         UG    0      0        0 host1
192.168.1.0     0.0.0.0         255.255.255.0   U     0      0        0 host1
```

########################## 192.168.1.1 ############## trema netns ############### ############################## exit ### ###:[#### + #] ###

## 13.4.1. #### ########

###### #### ################################################ #### ########### ########1 #################### ## #### 192.168.1.1 # #### ########

```
$ ./bin/trema netns host1
$ ping 192.168.1.1
PING 192.168.1.1 (192.168.1.1) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=1 ttl=128 time=47.4 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=2 ttl=128 time=15.0 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=3 ttl=128 time=15.0 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=4 ttl=128 time=19.3 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=5 ttl=128 time=14.8 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=6 ttl=128 time=14.4 ms
64 bytes from 192.168.1.1: icmp_seq=7 ttl=128 time=15.1 ms
^C
--- 192.168.1.1 ping statistics ---
7 packets transmitted, 7 received, 0% packet loss, time 6008ms
rtt min/avg/max/mdev = 14.425/20.189/47.473/11.245 ms
```

#### #### ##########################################################2 # ## #### 192.168.2.2 #########1 ## #### ######

```
$ ping 192.168.2.2
PING 192.168.2.2 (192.168.2.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=75.5 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=2 ttl=64 time=82.3 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=3 ttl=64 time=101 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=4 ttl=64 time=83.3 ms
```

```
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=5 ttl=64 time=78.2 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=6 ttl=64 time=76.4 ms
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=7 ttl=64 time=70.9 ms
^C
--- 192.168.2.2 ping statistics ---
7 packets transmitted, 7 received, 0% packet loss, time 6008ms
rtt min/avg/max/mdev = 70.995/81.159/101.180/9.050 ms
```

######### #### ######################################

## 13.4.2. ##### ########

## ##### ########################## ##### ###########

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get install iperf
```

##### ########################### ####2 ####### ##### ##############

```
$ ./bin/trema netns host2
$ iperf -s --bind 192.168.2.2
------------------------------------------------------------
Server listening on TCP port 5001
Binding to local address 192.168.2.2
TCP window size: 85.3 KByte (default)
------------------------------------------------------------
```

####1 ######## ##### #########################

```
$ ./bin/trema netns host1
$ iperf -c 192.168.2.2 --bind 192.168.1.2
------------------------------------------------------------
Client connecting to 192.168.2.2, TCP port 5001
Binding to local address 192.168.1.2
TCP window size: 85.0 KByte (default)
------------------------------------------------------------
[  3] local 192.168.1.2 port 5001 connected with 192.168.2.2 port 5001
[ ID] Interval       Transfer     Bandwidth
[  3]  0.0-16.4 sec   256 KBytes   128 Kbits/sec
```

################################################## ##### # ###, ##### ######## ########################

## 13.5. ###

##########################################

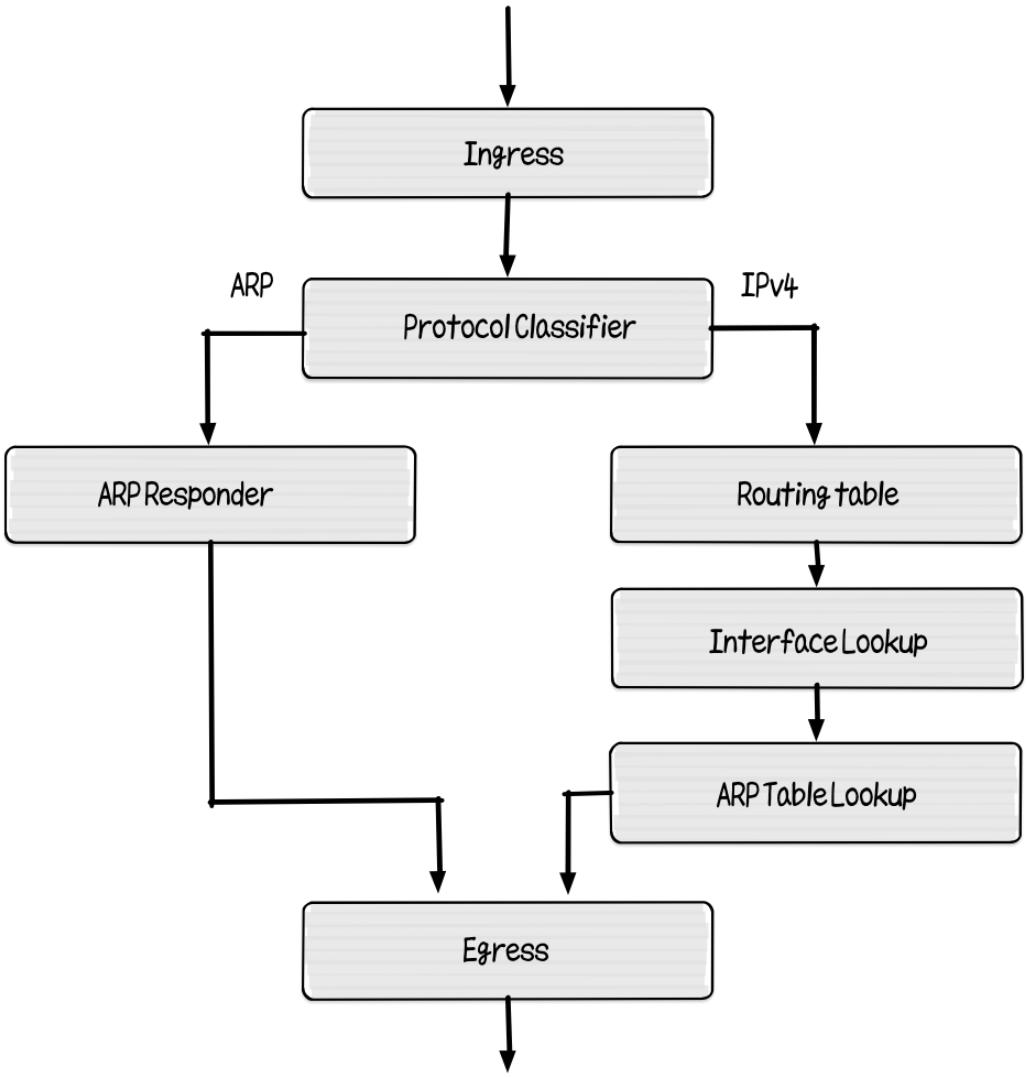
- ##################(#############)#########(#############)#################
  ##
- ##########################################################
- ######################################################## (########) ##
- ##############0.0.0.0/0#################################################
  #####
- ##############################################

# ####### 14. ### (##########)

########1.3 ##############################################

## 14.1. ####################

############### 14#1# 7 ################### ################## ### # ###4 ####
# 2 ############## ############

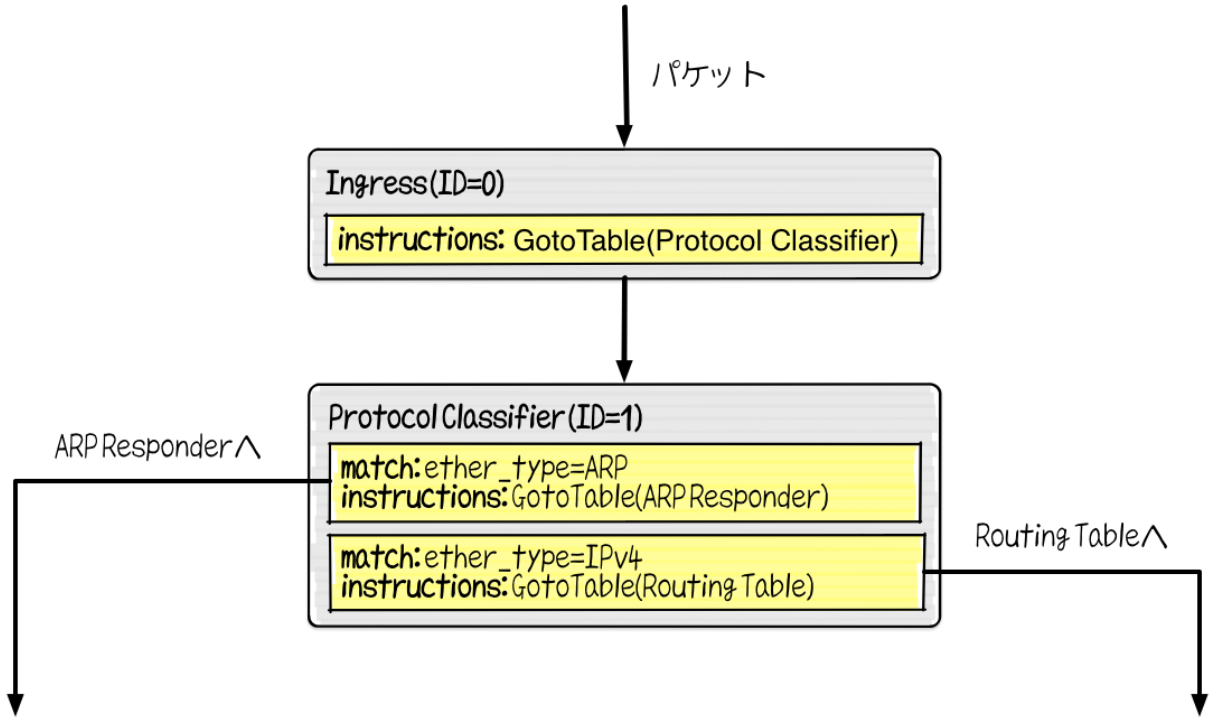



### ###### 14.1. ####################

#############################

### 14.1.1. ####### ############## ########## ####

############ ## # 0 ## ####### ######### (# 14#2)#




### ###### 14.2. ########### ## = 0 # ####### ########### ######## ########## #########

##### ####### ###################### ######## ######### ###########

######## ######### ############# ######################################### ###### ether_type ######### ### ##### ### ######### #########4 ##### ####### ##### ########################

## 14.1.2. ### ######### ####

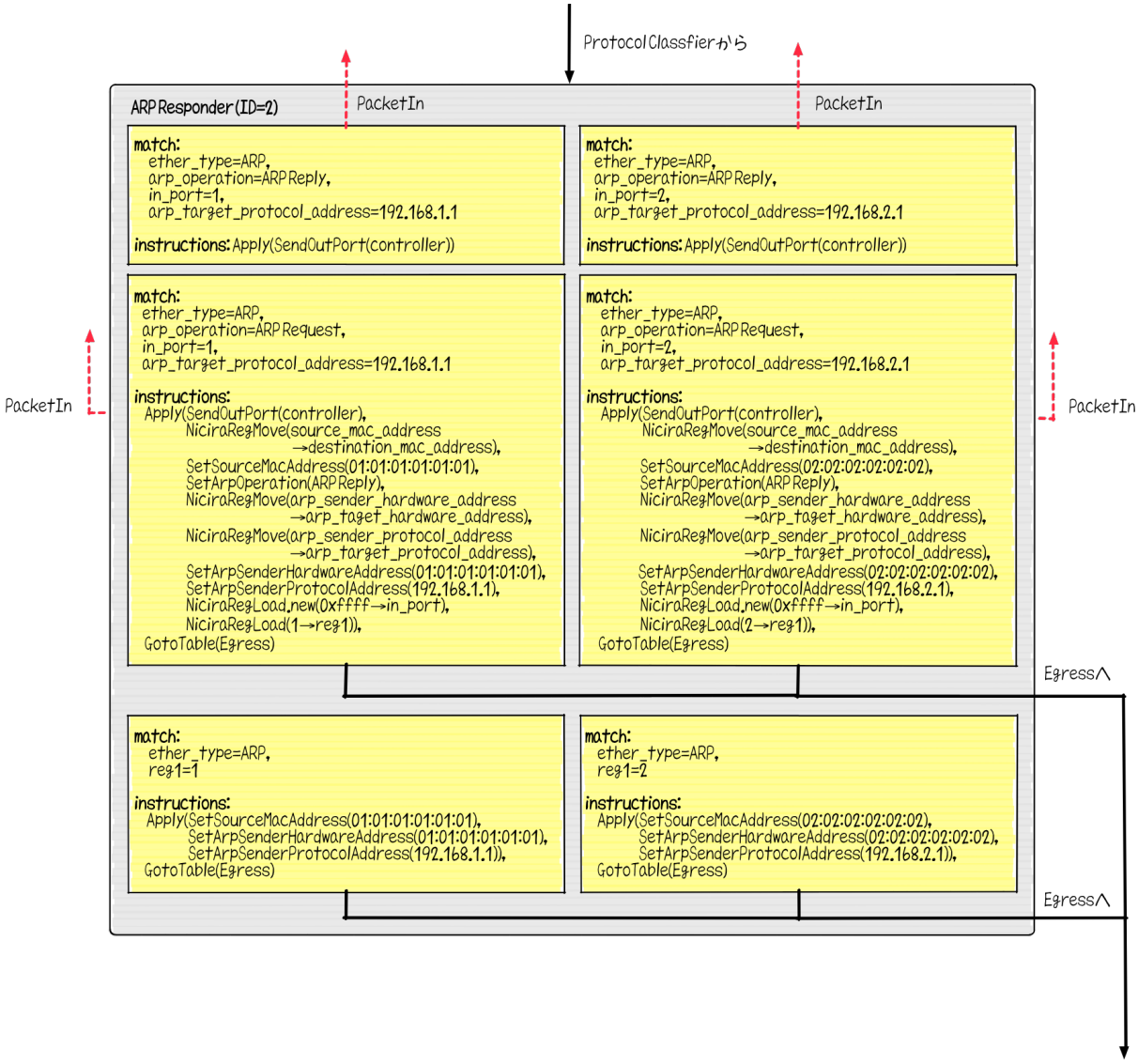
##### ### ######### ######### ################### ######### ##### ### ######### ################

########## ### #####
#### ### #########

######### ### #######
#### ### ############# ### ##### ### ##### ###

##### ###
######################

### ######### ########## 3 ## # ########################### 2 ######## 14#3##### ########### 6 ##################################

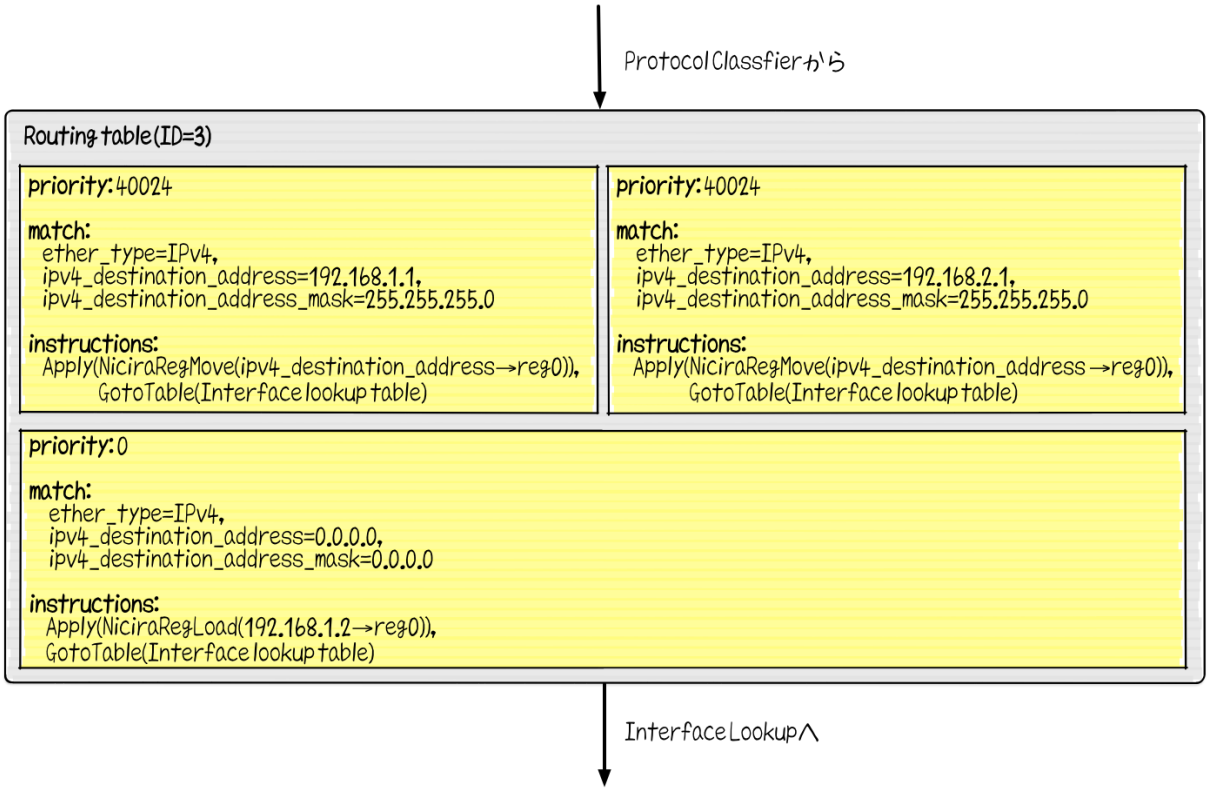



## ###### 14.3. ### ######### ##############

## 14.1.3. ####### ##### ####

##### ###4 ############# #####, ######### ###### ### ### ##### ###### # 3 ####### ##############

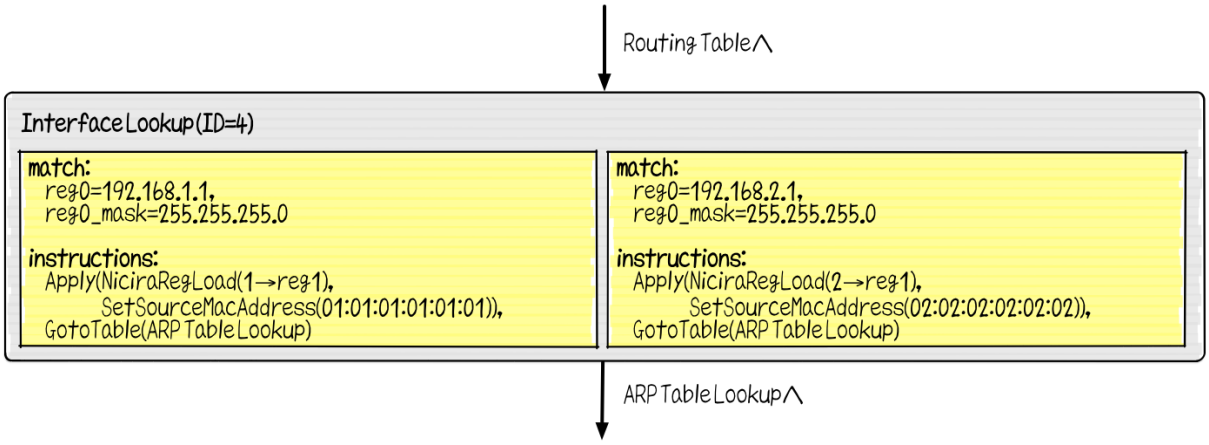
########## ####### ##### ################################################################ ## reg0 ##################################




###### 14.4. ### ######### #############

## 14.1.4. ######### ###### ####

######### ###### ############################ (# 14#5)######## ##### ######### reg0 ######################### reg1 #################### ### ######### ### ### ##################################################

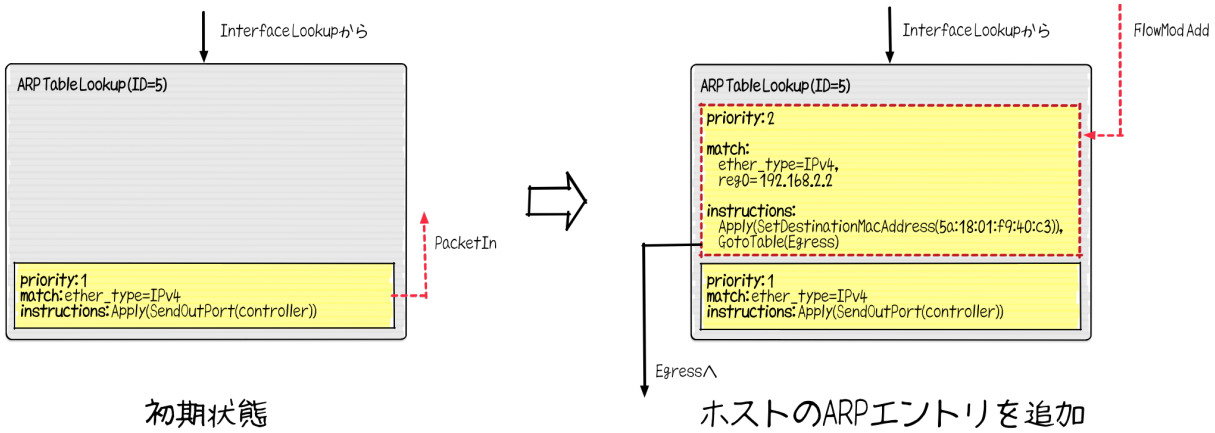



###### 14.5. ######### ###### #############

## 14.1.5. ### ##### ###### ####

### ##### ###### ########### ### ########## (# 14#6)# ####### ( reg0 ) ########### ### ########### ### ##############

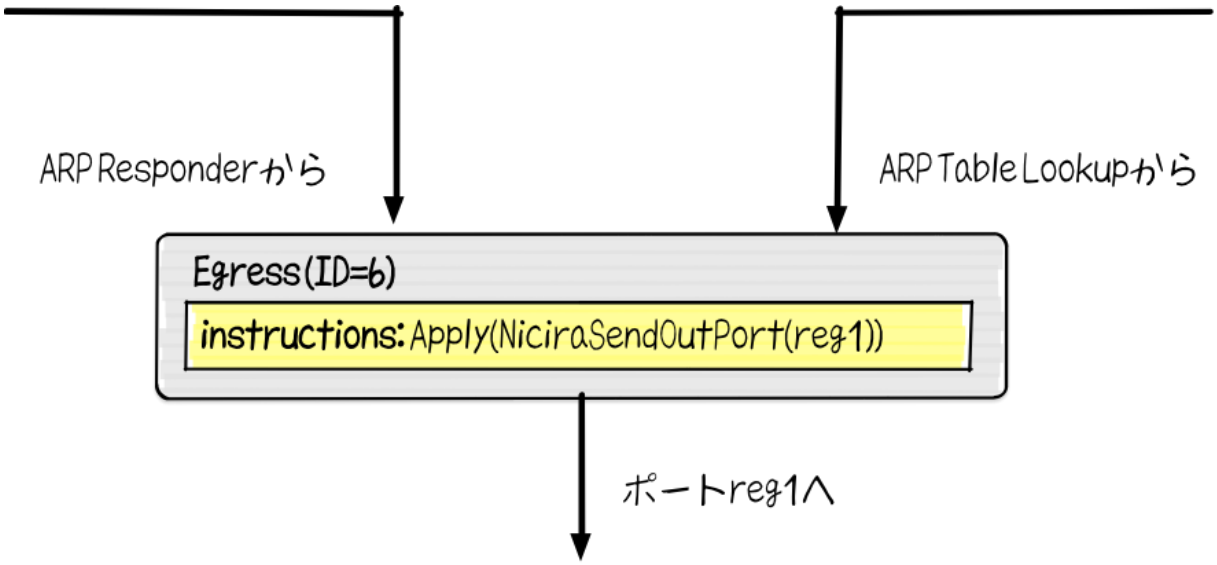
#################### 1 ######## ##### ######## ### ########################### ##############################




###### 14.6. ### ##### ###### #############

## 14.1.6. ###### ####

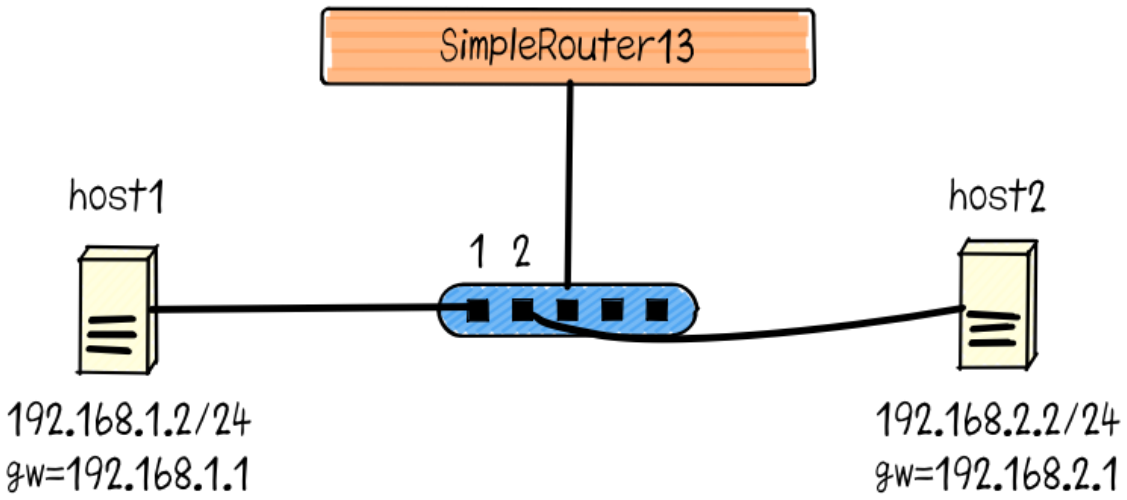
#################### ###### ######### (# 14#7)####### ######### reg1 ######## ##########




###### 14.7. ###### ############# ###1 ######

## 14.2. ##################

####################### 14#8################




### ###### 14.8. ############################

### ### ##### # #####/######_###### ################ ####################

```
$ git clone https://github.com/trema/simple_router.git
```

#### ### ############## ###### ####### #######

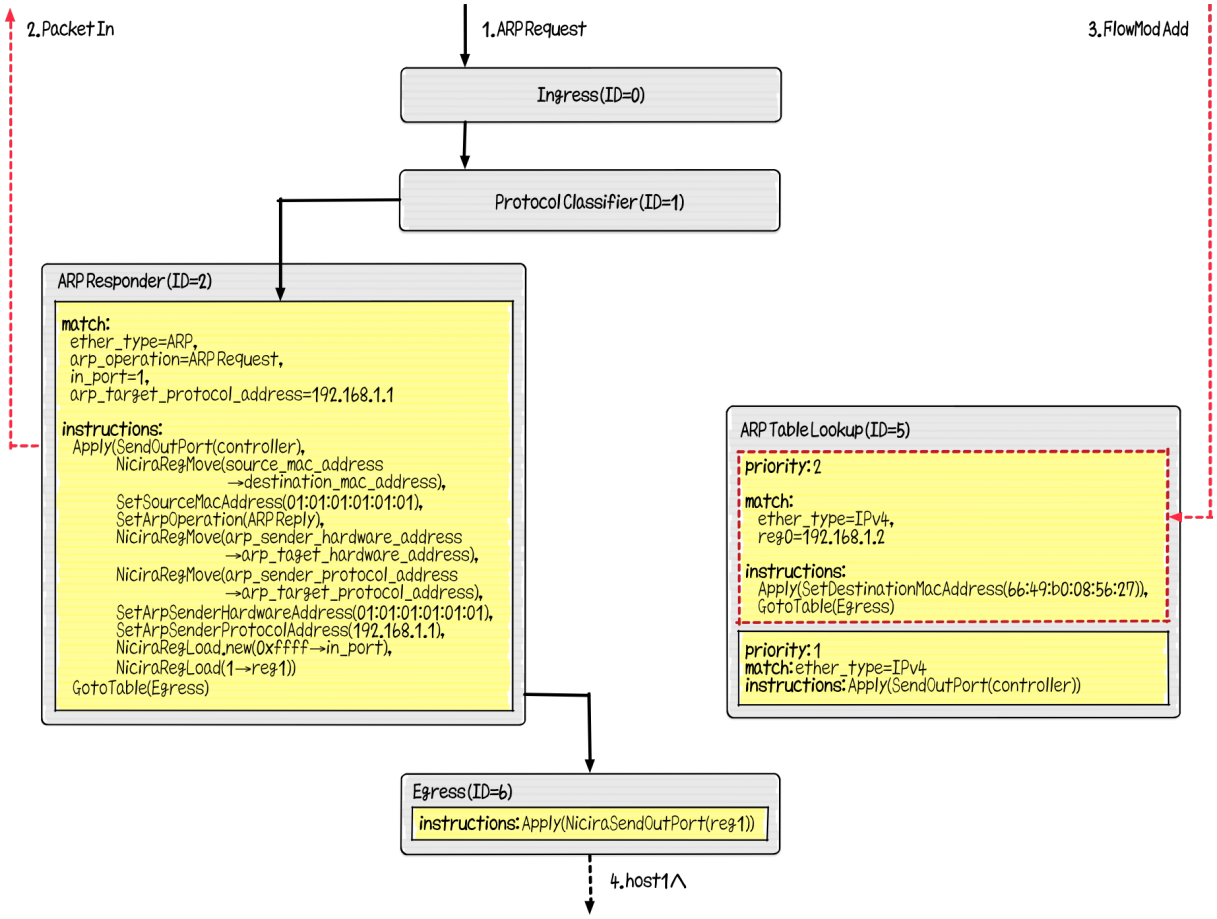
```
$ cd simple_router
$ bundle install --binstubs
```

###########

### 14.2.1. ##### ### ####### #####

####1 ######## 1 ### ### ####### ################# 14#9# 2 #########:

1. ####1 # ### #######
2. ### ##### # ####1 ###




## ###### 14.9. ####1 ######## 1 ## ### ####### #######

### ####1 # ### #######

### 1 ##### ### ####### ######### ###### ######## ########## ### ### ######### ## ############# (# 14#9 #1)#### ### ####### #### ####1 # ### ############ SendOutPort ############## ###### ## ### (# 14#9 # 2)#

############### ## #### ## ##### ### ################### ##### ###### ##### host1 ################### (# 14#9 # 3)#

#### ############13#### _ ### _ ##### (### / ###### _ ######13.##)

```
def add_arp_entry(ip_address, mac_address, dpid)
  send_flow_mod_add(
    dpid,
    table_id: ARP_TABLE_LOOKUP_TABLE,
    priority: 2,
    match: Match.new(ether_type: EthernetHeader::EtherType::IPV4,
                     reg0: IPv4Address.new(ip_address).to_i),
    instructions: [Apply.new(SetDestinationMacAddress.new(mac_address)),
                   GotoTable.new(EGRESS_TABLE)]
```

```
  )
end
```

### ##### # ####1 ###

################### ### ##### ######### ### ####### # ### ##### ############ ##########################

- ####### source_mac_address ### destination_mac_address ####
- source_mac_address ########### ### ##### ### ##########
- ### ######### ### ### ##### ####
- ### # sender_hardware_address (#### ### ####) ### target_hardware_address (### ### ####) ####
- ### # sender_protocol_address (#### ## ####) ### target_protocol_address (### ## ## ##) ####
- ### # sender_hardware_address ######### ### ##########
- ### # sender_protocol_address ######### ## ##########

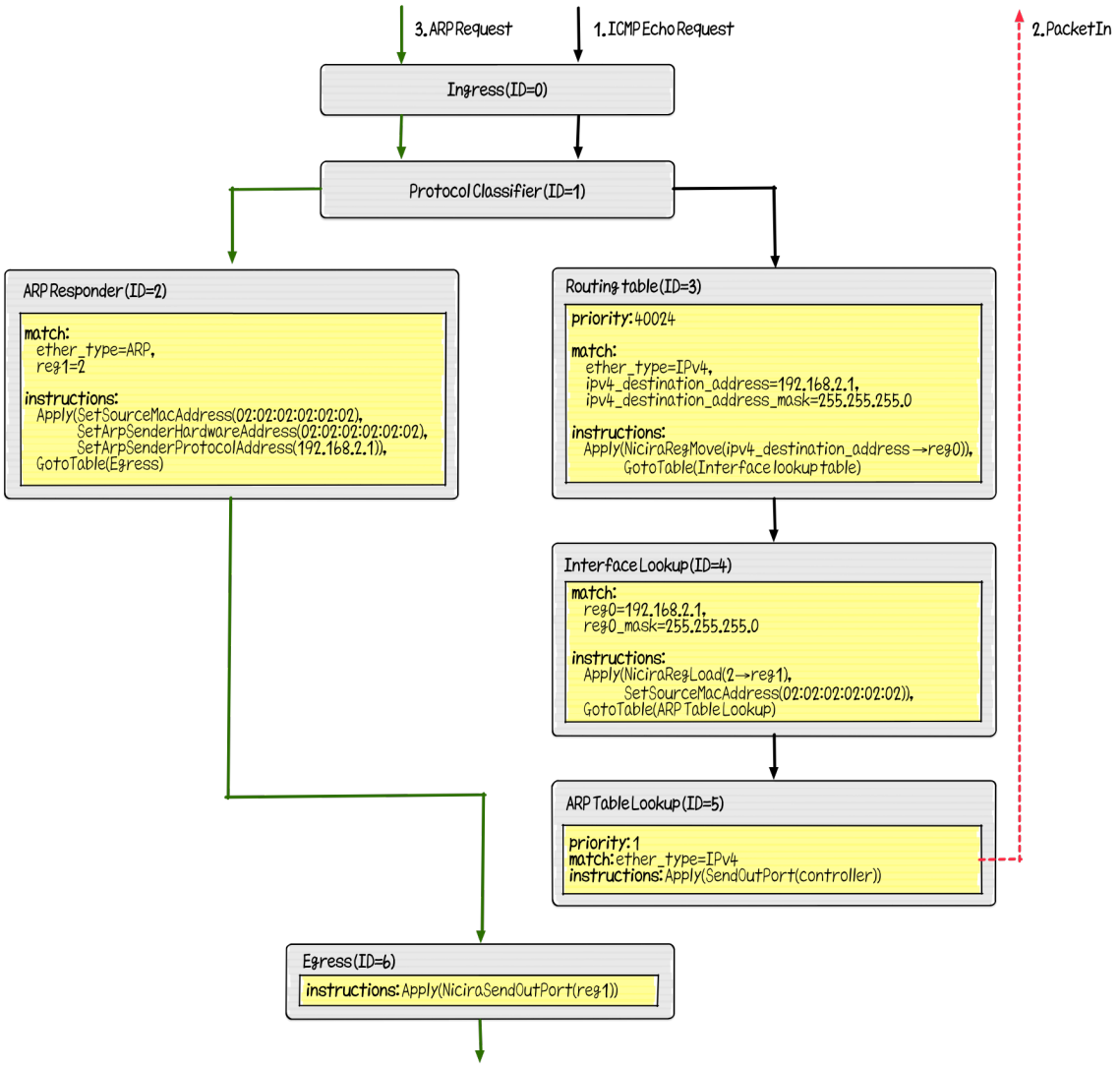
########## ### ##### ######### 1 (= host1 ##########) # reg1 ######### ##### # ###### ######### (# 14#9 # 4)####### ########## reg1 # ### ##### #######

## 14.2.2. ####1 ## ####2 # #### ##

# 14#8 ############ host1 ## host2 # #### ######################## ####2 # #### #### ####### ###############

1. ####1 ##### #### #### ####### ######### 1 ####
2. ######################## 2 ######
3. ####2 # ### ################### 2 ### ### ####### #####
4. ####2 #### ### ######## ### ##### #####
5. #### #### #### ####### ################### ####2 #####

###################### 14#10 ############# 1 ##### #### #### ####### ######### ##### # ######## ########## ### ####### ##### ############### (# 14#10 # 1)######## ##### # ######### ###### ########################




## ###### 14.10. ####1 # ####2 # #### #### ####### ######## ####2 # ### # #############

### 14.2.3. ###########

################## ## ################################ ####### ##### # ######### ###### ##### 2 ############## ##### ########## ## ######## 2 ################### ### [1]############ 192.168.2.2 # reg0 ################### ###### ################ ####### 2 # reg1 ########

[1] ############################## (#### ######### ######) ######################################## (################) ######### lib/simple_router13.rb # SimpleRouter13#add_routing_table_flow_entries ##### #########

## 14.2.4. ####2 # ### ####### ###

## ### ##### ###### ##### ####2 # ### ###############2 # ### ################### ####### ##################### ###### ## ### (# 14#10 # 2)#

####### ###### ## ################ ###########################2 # ### ######### ### ### ####### ######### ###### ### ### (# 14#10 # 3)######## ####### ## `reg1` (## ####) # 2 ###########

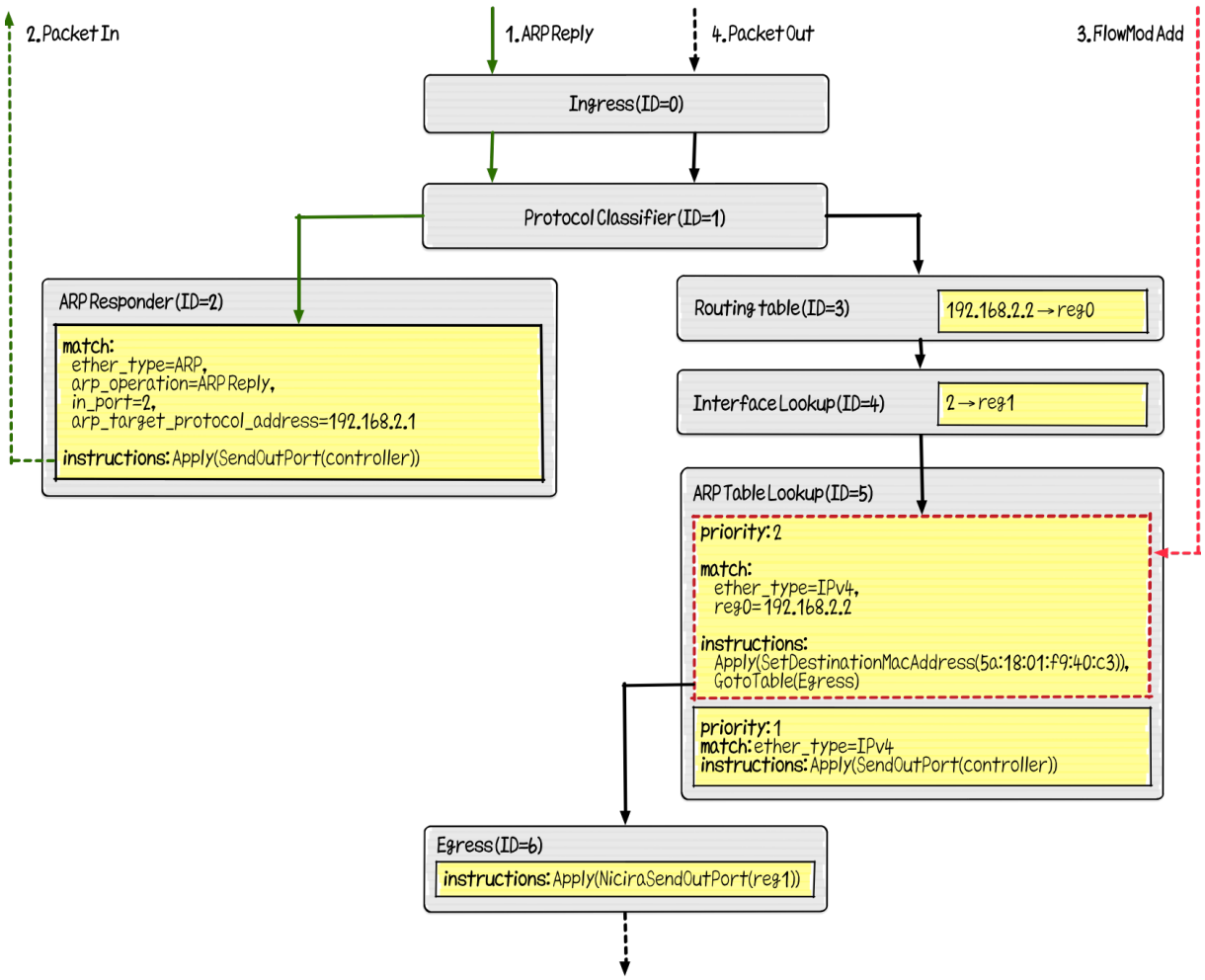
############13#######_##_###4 (###/######_######13.##)

```
def packet_in_ipv4(dpid, packet_in)
  dest_ip_address = IPv4Address.new(packet_in.match.reg0.to_i)
  @unresolved_packet_queue[dest_ip_address] += [packet_in.raw_data]
  send_packet_out(
    dpid,
    raw_data: Arp::Request.new(target_protocol_address: dest_ip_address,
                               source_mac: '00:00:00:00:00:00',
                               sender_protocol_address: '0.0.0.0').to_binary,
    actions: [NiciraRegLoad.new(packet_in.match.reg1, :reg1),
              SendOutPort.new(:table)]
  )
end
```

########### ### ####### ##### ######### ######################## `reg1` #### ### ####### # ### ##### ## ######## 2 ################## ###### ####2 ########

## 14.2.5. ####2 ### ### ##### ###

####2 ### ### ##### ############ ###### ## ### (# 14#11 # 1, 2)#




## ###### 14.11. ####2 # ### ######## #### #### ####### # ####2 #########

### ##### ############################## ##### ##### ####2 # ### ############ # ### ##### ###### ########## (# 14#11 # 3)######## ######################## ######## ### ##### ####### ######### (# 14#11 # 4)#

### ############13#######_##_### (###/######_######13.##)

```
def packet_in_arp(dpid, packet_in)
  add_arp_entry(packet_in.sender_protocol_address,
                packet_in.sender_hardware_address,
                dpid)
  @unresolved_packet_queue[packet_in.sender_protocol_address].each do |each|
    send_packet_out(dpid, raw_data: each, actions: SendOutPort.new(:table))
  end
  @unresolved_packet_queue[packet_in.sender_protocol_address] = []
end
```

### ####1 ## ####2 ## #### #### ####### ######### ####2 ### #### #### ##### ###### ###### ####1 #######

## 14.3. #######

############ (###/######_######13.##) ######12 ##13 ##################
########1.3 ###### trema run ######### --openflow13 ################

```
$ ./bin/trema run ./lib/simple-router.rb -c ./trema.conf --openflow13
SimpleRouter13 started.
```

################# host1 ## host2 # #### ##########

```
$ bundle exec trema netns host1 "ping -c1 192.168.2.2"
PING 192.168.2.2 (192.168.2.2) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.2.2: icmp_seq=1 ttl=64 time=132 ms

--- 192.168.2.2 ping statistics ---
1 packets transmitted, 1 received, 0% packet loss, time 0ms
rtt min/avg/max/mdev = 132.738/132.738/132.738/0.000 ms
```

#### ####2 ######## trema dump_flows ################################

```
$ bundle exec trema dump_flows 0x1
OFPST_FLOW reply (OF1.3) (xid=0x2):
 cookie=0x0, duration=153.160s, table=0, n_packets=21, n_bytes=1546, priority=0 actions=goto_table:1
 cookie=0x0, duration=153.160s, table=1, n_packets=6, n_bytes=296, priority=0,arp actions=goto_table:2
 cookie=0x0, duration=153.160s, table=1, n_packets=4, n_bytes=392, priority=0,ip actions=goto_table:3
 cookie=0x0, duration=153.152s, table=2, n_packets=1, n_bytes=42,
 priority=0,arp,in_port=1,arp_tpa=192.168.1.1,arp_op=1 actions=move:NXM_OF_ETH_SRC[]-
>NXM_OF_ETH_DST[],set_field:01:01:01:01:01:01->eth_src,set_field:2-
>arp_op,move:NXM_NX_ARP_SHA[]->NXM_NX_ARP_THA[],move:NXM_OF_ARP_SPA[]-
>NXM_OF_ARP_TPA[],set_field:01:01:01:01:01:01->arp_sha,set_field:192.168.1.1->arp_spa,load:0xffff-
>OXM_OF_IN_PORT[],load:0x1->NXM_NX_REG1[],goto_table:6
 cookie=0x0, duration=153.142s, table=2, n_packets=1, n_bytes=42,
 priority=0,arp,in_port=1,arp_tpa=192.168.1.1,arp_op=2 actions=CONTROLLER:65535
 cookie=0x0, duration=153.103s, table=2, n_packets=1, n_bytes=42,
 priority=0,arp,in_port=2,arp_tpa=192.168.2.1,arp_op=1 actions=move:NXM_OF_ETH_SRC[]-
>NXM_OF_ETH_DST[],set_field:02:02:02:02:02:02->eth_src,set_field:2-
>arp_op,move:NXM_NX_ARP_SHA[]->NXM_NX_ARP_THA[],move:NXM_OF_ARP_SPA[]-
>NXM_OF_ARP_TPA[],set_field:02:02:02:02:02:02->arp_sha,set_field:192.168.2.1->arp_spa,load:0xffff-
>OXM_OF_IN_PORT[],load:0x2->NXM_NX_REG1[],goto_table:6
 cookie=0x0, duration=153.093s, table=2, n_packets=1, n_bytes=42,
 priority=0,arp,in_port=2,arp_tpa=192.168.2.1,arp_op=2 actions=CONTROLLER:65535
```

```
 cookie=0x0, duration=153.130s, table=2, n_packets=1, n_bytes=64, priority=0,arp,reg1=0x1
 actions=set_field:01:01:01:01:01:01->eth_src,set_field:01:01:01:01:01:01->arp_sha,set_field:192.168.1.1-
>arp_spa,goto_table:6
 cookie=0x0, duration=153.083s, table=2, n_packets=1, n_bytes=64, priority=0,arp,reg1=0x2
 actions=set_field:02:02:02:02:02:02->eth_src,set_field:02:02:02:02:02:02->arp_sha,set_field:192.168.2.1-
>arp_spa,goto_table:6
 cookie=0x0, duration=153.064s, table=3, n_packets=2, n_bytes=196,
 priority=40024,ip,nw_dst=192.168.1.0/24 actions=move:NXM_OF_IP_DST[]-
>NXM_NX_REG0[],goto_table:4
 cookie=0x0, duration=153.055s, table=3, n_packets=2, n_bytes=196,
 priority=40024,ip,nw_dst=192.168.2.0/24 actions=move:NXM_OF_IP_DST[]-
>NXM_NX_REG0[],goto_table:4
 cookie=0x0, duration=153.073s, table=3, n_packets=0, n_bytes=0, priority=0,ip actions=load:0xc0a80102-
>NXM_NX_REG0[],goto_table:4
 cookie=0x0, duration=153.047s, table=4, n_packets=2, n_bytes=196, priority=0,reg0=0xc0a80100/0xffffff00
 actions=load:0x1->NXM_NX_REG1[],set_field:01:01:01:01:01:01->eth_src,goto_table:5
 cookie=0x0, duration=153.039s, table=4, n_packets=2, n_bytes=196, priority=0,reg0=0xc0a80200/0xffffff00
 actions=load:0x2->NXM_NX_REG1[],set_field:02:02:02:02:02:02->eth_src,goto_table:5
 cookie=0x0, duration=122.241s, table=5, n_packets=1, n_bytes=98, priority=2,ip,reg0=0xc0a80202
 actions=set_field:1e:36:b3:90:02:e5->eth_dst,goto_table:6
 cookie=0x0, duration=122.180s, table=5, n_packets=1, n_bytes=98, priority=2,ip,reg0=0xc0a80102
 actions=set_field:e6:b6:de:b6:ed:1e->eth_dst,goto_table:6
 cookie=0x0, duration=153.027s, table=5, n_packets=2, n_bytes=196, priority=1,ip
 actions=CONTROLLER:65535
 cookie=0x0, duration=153.022s, table=6, n_packets=6, n_bytes=408, priority=0
 actions=output:NXM_NX_REG1[]
```

########## `table=##` ######## ## ##########################################################

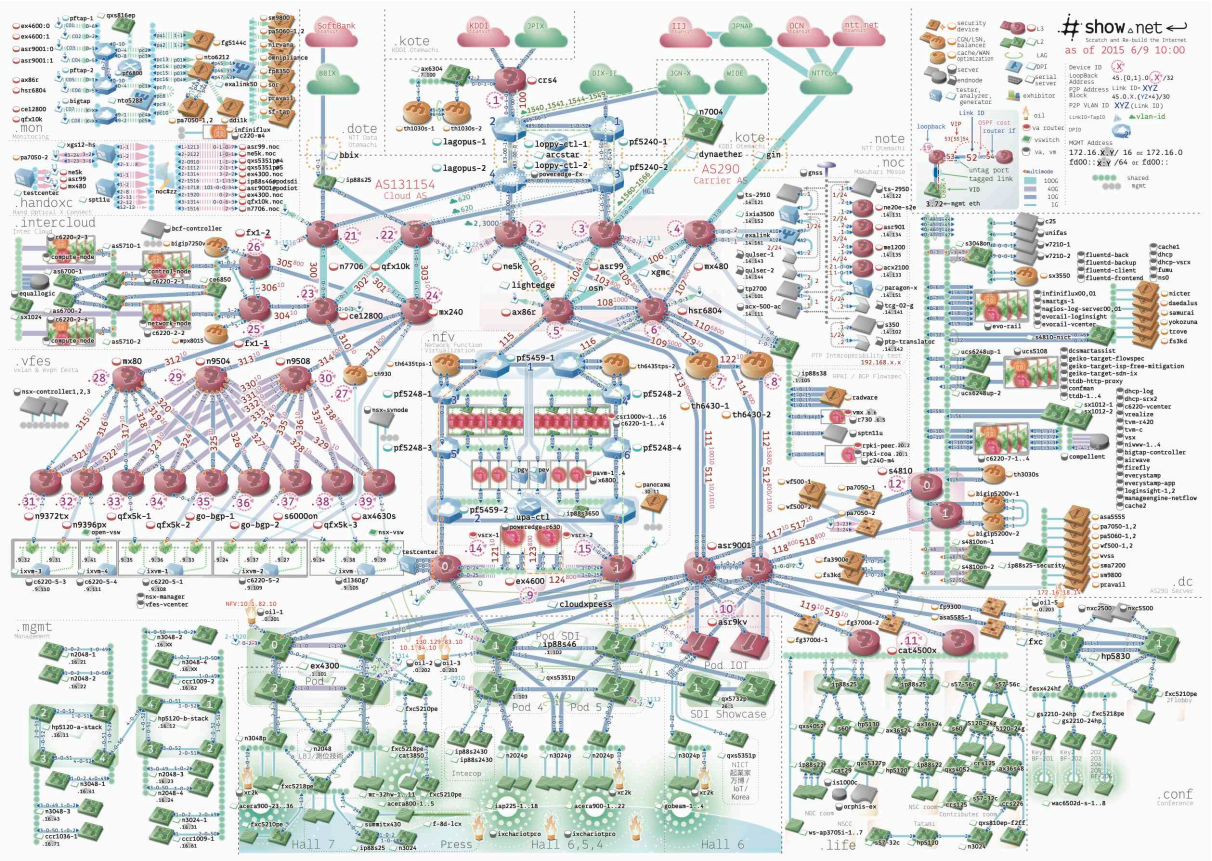
# ####### 15. ################

################################ ####### #########

## 15.1. ############

#################################################!#######################
######### ######### ############## ####### ##### ###########################
######################################## #1 ################################
#####

####### ########################## ##### ######## ####### ######## (# 15#1)#####
########## ##########################################################?#########
##############?#############################################################
#######################




###### 15.1. 2015 # ####### ##### # ####### #########: ####://###.#######.##/2015/#######/######/########02.### ######### # ####### ##### 2015 ####### ### #### ###### ### #### ### #####, ###. ### ###### ########.

####### ##############################################1#######################
##########################################################

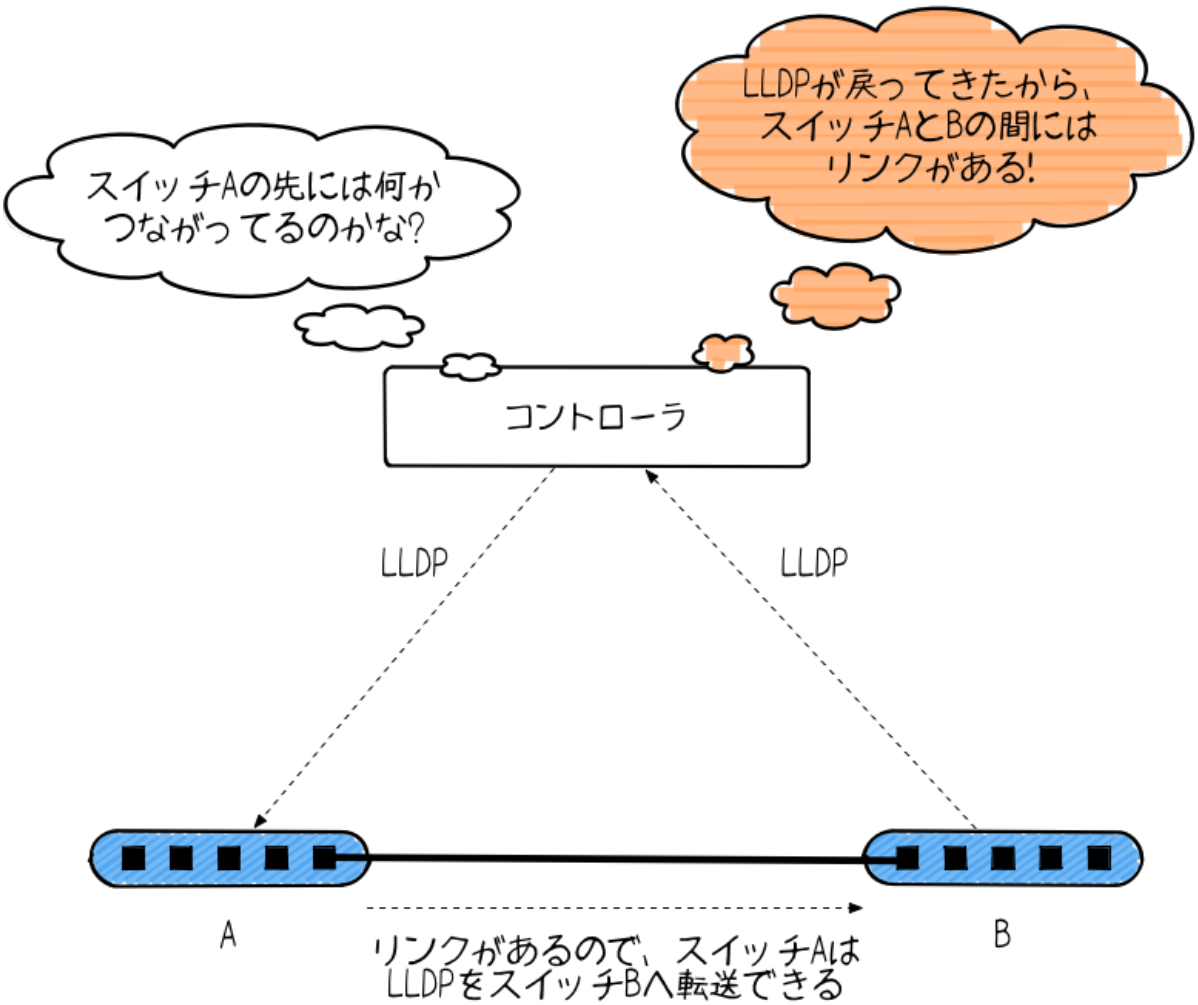
######## ##################################################################
################################################### (#####) #############

## 15.2. ##########

#############################################################
## switch_ready ##### ######## #######/##### ################################
################################

### 15.2.1. ######

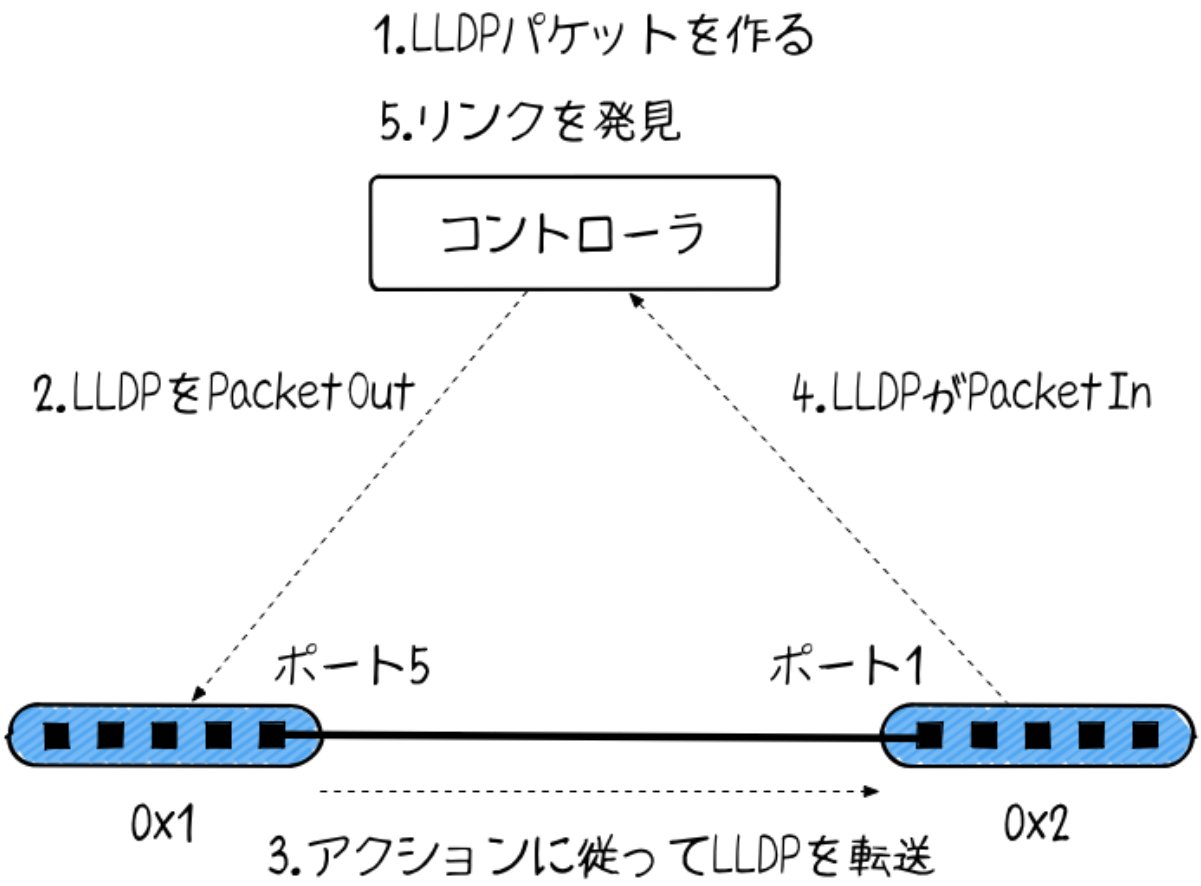
######## ######################### ##### ######### ######## (####) ###########
# (# 15#2)################################### # # #### ################### ##
###### # ################################ ################################
#### ################### # # # ######################### ###################
############# # # # ######################################################
#######




## ###### 15.2. #### ############

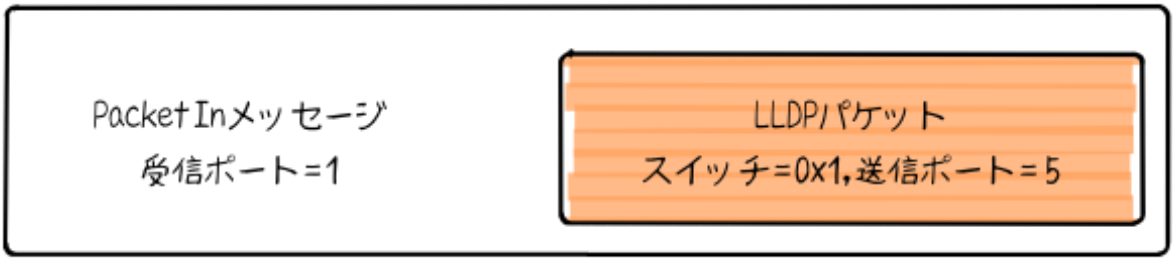
######## ######################################## #### ######################## ############################### ######## ############################## ###### ####### ##################

#### ######## ####### ################# 15#3 ######### 0#1 #### 5 ##### 0#3 ### 1 ##########################################




## ###### 15.3. #### ##### ######## ################

1. ###################### ######## ## 0#1 ###### 5 ###### #### ##### ######### ######## (####) #######
2. ### 5 ################ ###### ### ############### ############# 0#1 ####
3. ###### ### ################################### 5 ############### ###### ### 5 ########### 0#2 ######
4. #### ############## 0#2 ################################### #### ########## ################### ############### ## ###############
5. ############# ###### ## ########################### 0#2 #### 15#4 # ###### ## ########################### 0#1 #### 5 ###### 0#2 #### 1 ############

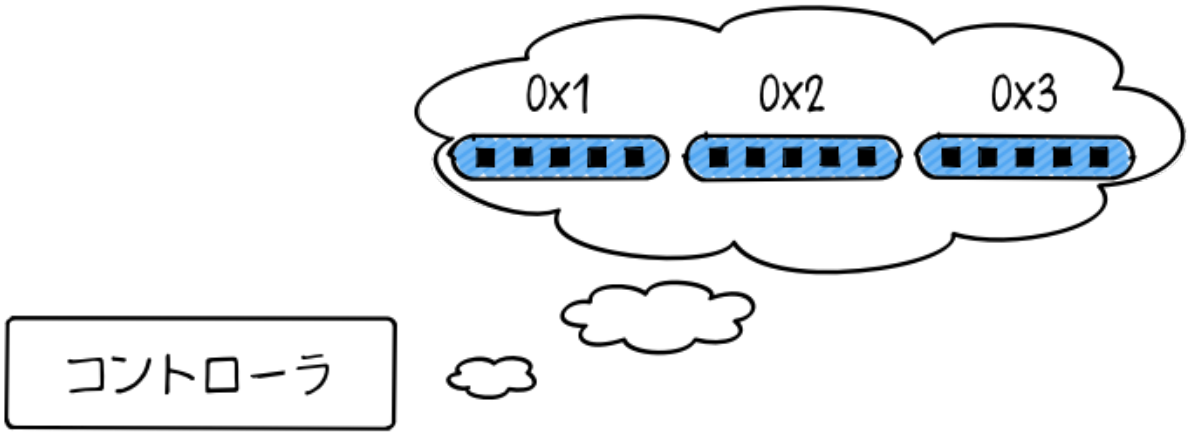


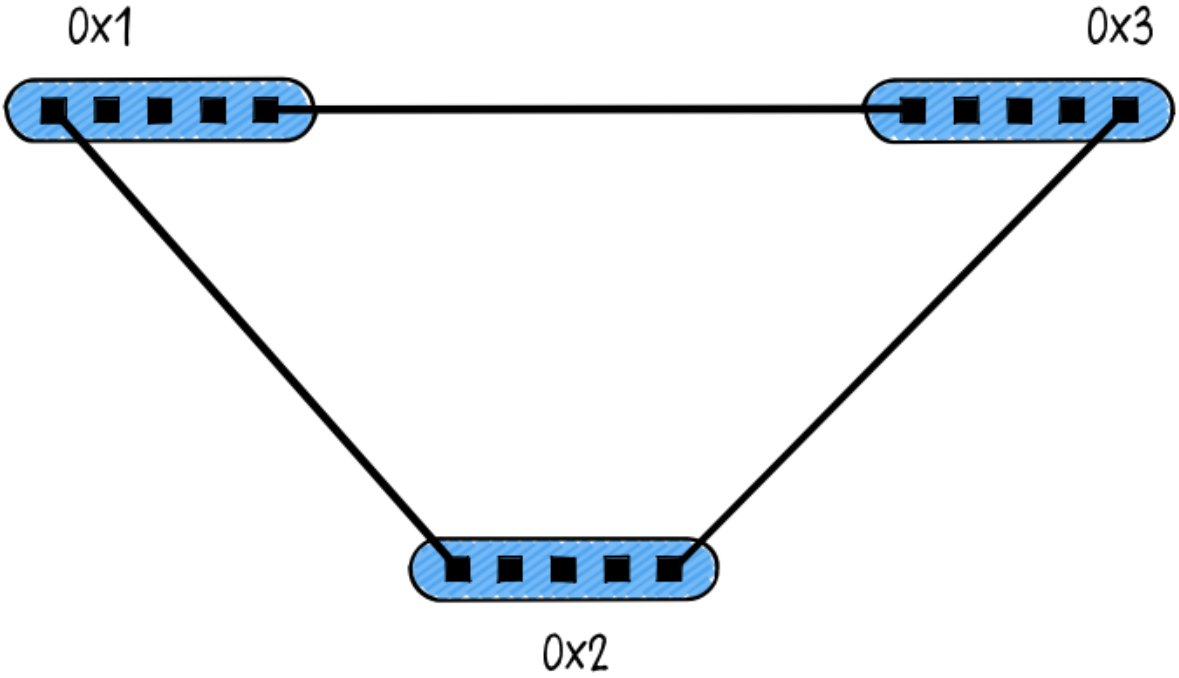

### ###### 15.4. #### 0#2 ######## ###### ## #####

############ ### ##### #### ###################### ###### ## ################## ######################################### ################################ ######## ############################### ### # ###### ## ####### ######### ##### ###############

## 15.2.2. #######

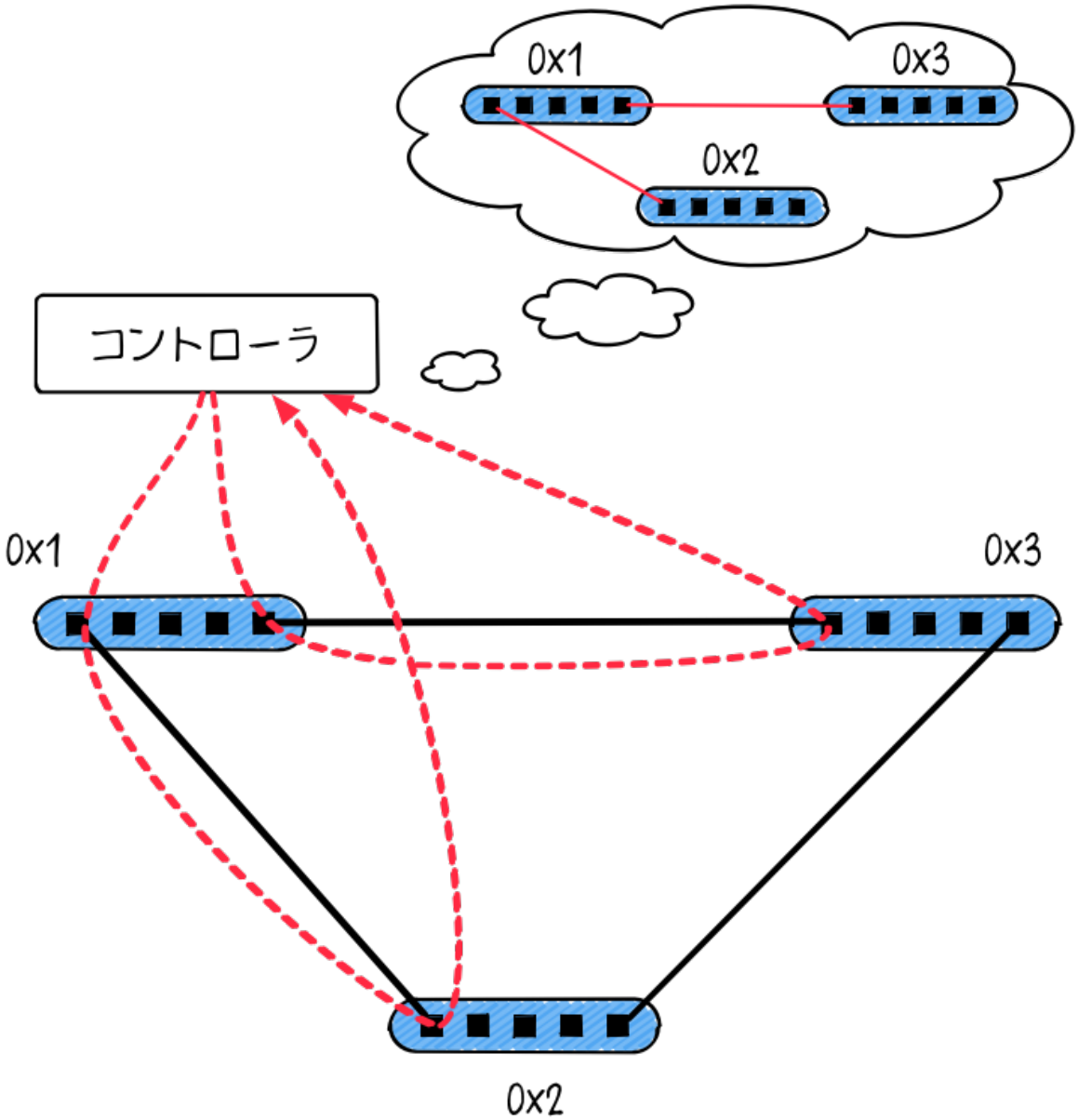
#################################################################################
######### 15#5#### 3 ## ######## ############################################
# ######## ##########################################################




## ###### 15.5. ##############

###### 0#1 ############# ######## ####### ################ 0#1 ############### ################################ (# 15#6)########## 0#1 ###### 0#2 ####### 0#3 # ##################




### ###### 15.6. #### 0#1 ##########

########################################### 0#2, 0#3 ######################### ####################

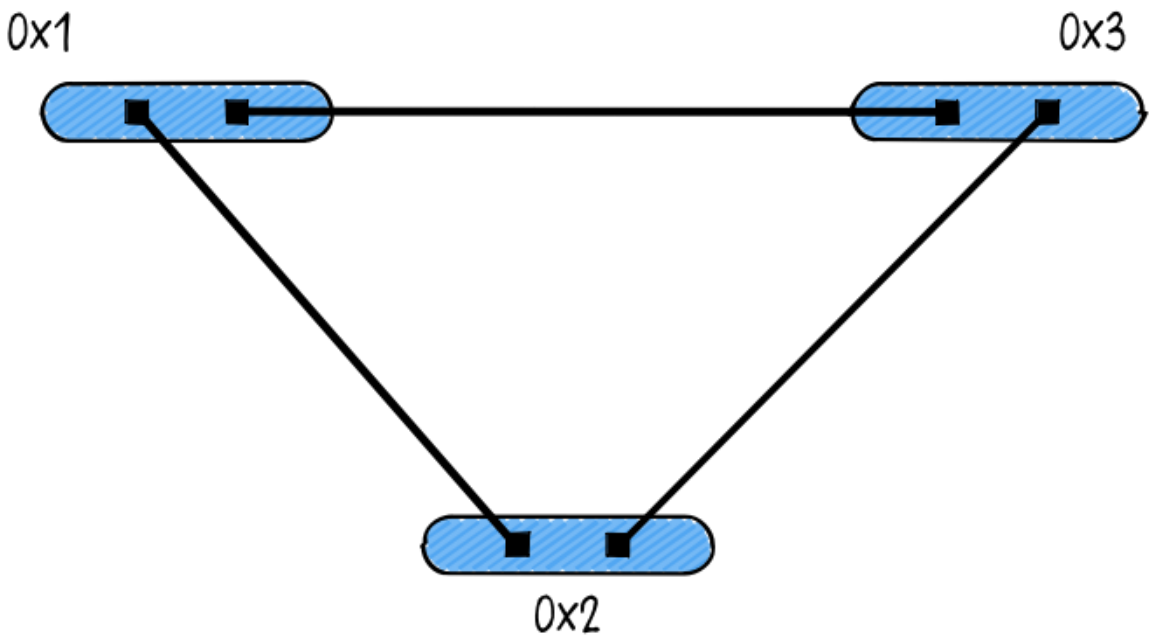
## 15.3. #######

############# ######## ######################################### ###### # #####/ ######## ##### (#####://######.###/#####/########) ##################### git clone ########### bundle install #### ### ##############

```
$ git clone https://github.com/trema/topology.git
$ cd topology
```

```
$ bundle install --binstubs
```

########### `triangle.conf` ##### 3 ######################## (# 15#7)#




## ###### 15.7. ########.#########

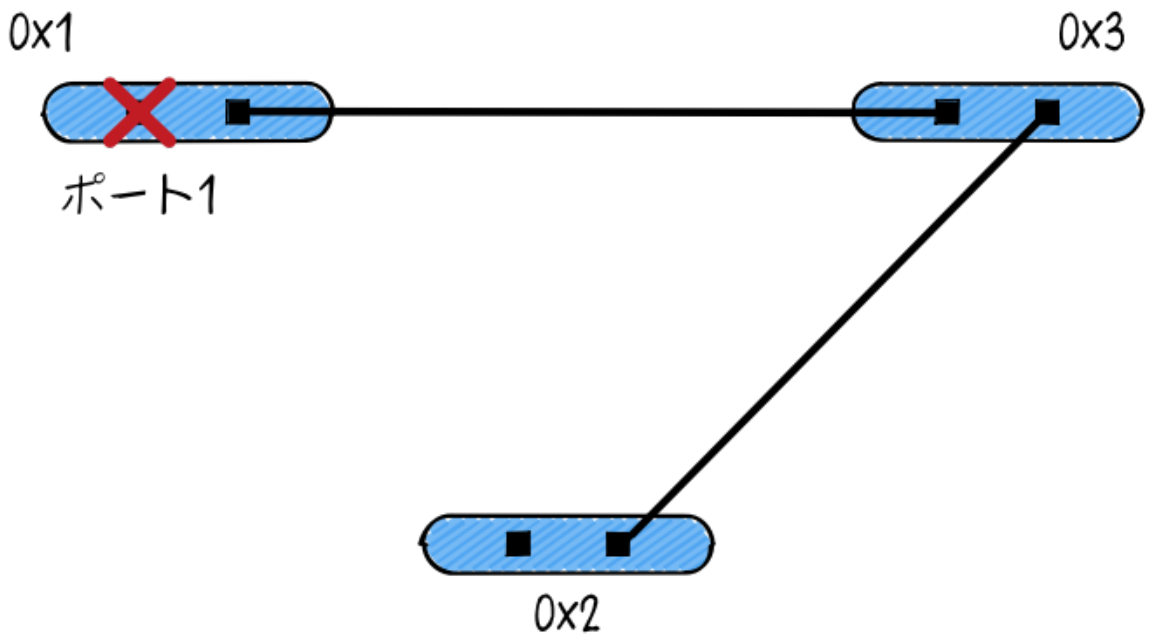
################################

```
$ ./bin/trema run ./lib/topology_controller.rb -c triangle.conf
Topology started (text mode).
Port 0x1:1 added: 1
Port 0x1:2 added: 1, 2
Switch 0x1 added: 0x1
Port 0x3:1 added: 1
Port 0x3:2 added: 1, 2
Switch 0x3 added: 0x1, 0x3
Port 0x2:1 added: 1
Port 0x2:2 added: 1, 2
Switch 0x2 added: 0x1, 0x2, 0x3
Link 0x1-0x2 added: 0x1-0x2
Link 0x1-0x3 added: 0x1-0x2, 0x1-0x3
Link 0x2-0x3 added: 0x1-0x2, 0x1-0x3, 0x2-0x3
```

################### ######## ##### ################################ `Port 0x1:1 added` ####### 0#1 #### 1 #################### `Switch 0x1 added` ########## ######## ##### ################### ## #########

####### #### ################ Link 0x1-0x2 added ##### 0#1 ## 0#2 # #### ####### ####### ######## ############################################ ( Link 0x2-0x3 added: 0x1-0x2, 0x1-0x3, 0x2-0x3 ######) #########

##########################




## ###### 15.8. #### 0#1 #### 1 #############

#### 15#8######## 0#1 #### 1 ############

```
$ ./bin/trema port_down --switch 0x1 --port 1
```

################################## 0#1#0#2 ############# 0#1#0#3 # 0#2#0#3 ## ########

```
Link 0x1-0x2 deleted: 0x1-0x3, 0x2-0x3
Port 0x1:1 deleted: 2
```

##############################

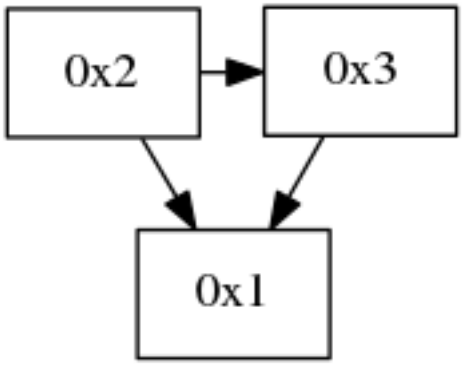
```
$ ./bin/trema port_up --switch 0x1 --port 1
```

```
Port 0x1:1 added: 1, 2
Link 0x1-0x2 added: 0x1-0x2, 0x1-0x3, 0x2-0x3
```

############################################## ######## ###### `apt-get` ####
############## `trema run` #### `--` # `graphviz` ############ #######

```
$ ./bin/trema run ./lib/topology_controller.rb -c triangle.conf -- graphviz /tmp/topology.png
```

####### 15#9 ##################




###### 15.9. ##########################

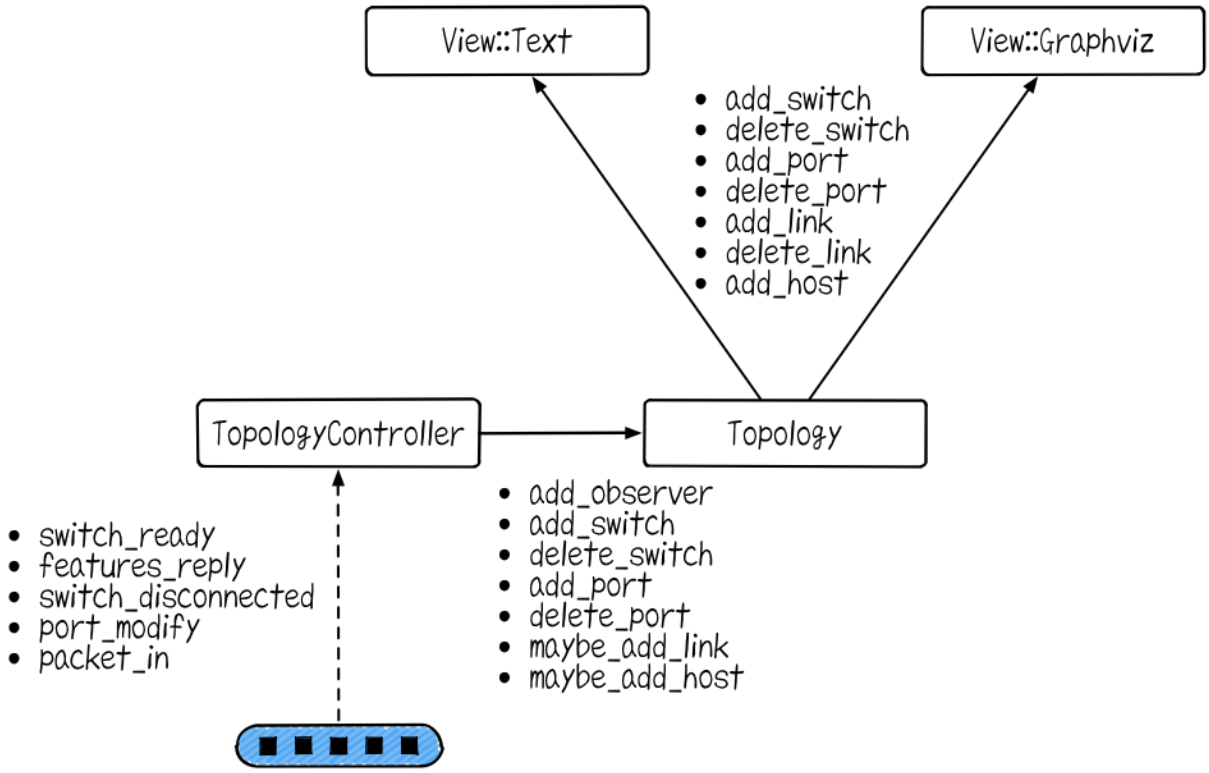
## 15.4. ##################

################ 3 ########## (# 15#10)#

`TopologyController` ###
    ############################## ######## ############

`Topology` ###
    ###################### #### #########

`View::Text` , `View::Graphviz` ###
    ####################




## ###### 15.10. ##########

############# ### ### (####################) ######## TopologyController # ### ### # ######### ############# ################################### ######## Topology #### ##### ################################ View::Text # View::Graphviz ####### #### ########## ######## ########

######### ### ########################################### #### ## ############### View::Html ###################### TopologyController # Topology ########################################################################### ### ######################

## 15.4.1. ###############

TopologyController ########### ################### start ################### ################### ( View::Text ) ########### ( View::Graphviz ) ################# ######### ( Topology ) ########### ( @topology.add_observer ) ####

#### ########################

```
def start(args)
  @command_line = CommandLine.new(logger)
  @command_line.parse(args)
  @topology = Topology.new
  @topology.add_observer @command_line.view
```

```
  logger.info "Topology started (#{@command_line.view})."
end
```

######################################## Topology ####################
( View::Text ### View::Graphviz ) ###################### Topology ############
######################

#############################:

- add_switch : ###########
- delete_switch : ###########
- add_port : ##########
- delete_port : ##########
- add_link : ##########
- delete_link : ##########

################################################ View::Text ######
add_switch # add_port ################################################

###/####/####.##

```
module View
  # Topology controller's CUI.
  class Text
    def initialize(logger)
      @logger = logger
    end

    def add_switch(dpid, topology)
      show_status("Switch #{dpid.to_hex} added",
                  topology.switches.map(&:to_hex))
    end

    def delete_switch(dpid, topology)
      show_status("Switch #{dpid.to_hex} deleted",
                  topology.switches.map(&:to_hex))
    end

    def add_port(port, topology)
      add_or_delete_port :added, port, topology
    end

    def delete_port(port, topology)
```

```
    add_or_delete_port :deleted, port, topology
  end

  def add_link(port_a, port_b, topology)
    link = format('%#x-%#x', *([port_a.dpid, port_b.dpid].sort))
    show_status "Link #{link} added", topology.links
  end

  def delete_link(port_a, port_b, topology)
    link = format('%#x-%#x', *([port_a.dpid, port_b.dpid].sort))
    show_status "Link #{link} deleted", topology.links
  end

  def to_s
    'text mode'
  end

  private

  def add_or_delete_port(message, port, topology)
    ports = topology.ports[port.dpid].map(&:number).sort
    show_status "Port #{port.dpid.to_hex}:#{port.number} #{message}", ports
  end

  def show_status(message, objects)
    status = objects.sort.map(&:to_s).join(', ')
    @logger.info "#{message}: #{status}"
  end
 end
end
```

### ########################################## Topology ############## Topology#add_observer ################## Topology ########################## ##########################################################################################
## Topology ##################################################

## 15.4.2. ######## ########

TopologyController ########### ####### ###############

switch_ready ######################################### ####### ############# ####### features_reply ############## ####### ##### ########################## ###### @topology ################### ################

#######################_#####, ##########################_#####

```
def switch_ready(dpid)
  send_message dpid, Features::Request.new
end

def features_reply(dpid, features_reply)
  @topology.add_switch dpid, features_reply.physical_ports.select(&:up?)
end
```

########################################

- switch_disconnected : ######################### ( @topology ) ######
- port_modify : ######## (###########) ############ @topology #####
- packet_in : ##### #### ########################### @topology #####

#########################_############, #######################_######, #########################_##

```
def switch_disconnected(dpid)
  @topology.delete_switch dpid
end

def port_modify(_dpid, port_status)
  updated_port = port_status.desc
  return if updated_port.local?
  if updated_port.down?
    @topology.delete_port updated_port
  elsif updated_port.up?
    @topology.add_port updated_port
  else
    fail 'Unknown port status.'
  end
end

def packet_in(dpid, packet_in)
  if packet_in.lldp?
    @topology.maybe_add_link Link.new(dpid, packet_in)
  else
    @topology.maybe_add_host(packet_in.source_mac,
                             packet_in.source_ip_address,
                             dpid,
                             packet_in.in_port)
  end
end
```

## 15.4.3. #### ############

#### ########### flood_lldp_frames ##################### @topology ############ ### ( @topology.ports ) ########### ### # #### ###########

#######################_####_######

```
class TopologyController < Trema::Controller
  timer_event :flood_lldp_frames, interval: 1.sec

  def flood_lldp_frames
    @topology.ports.each do |dpid, ports|
      send_lldp dpid, ports
    end
  end

  private

  def send_lldp(dpid, ports)
    ports.each do |each|
      port_number = each.number
      send_packet_out(
        dpid,
        actions: SendOutPort.new(port_number),
        raw_data: lldp_binary_string(dpid, port_number)
      )
    end
  end
```

## 15.4.4. #########

Topology ################### TopologyController ### ######## ################ ########################################################## add_switch ##### ########################## add_switch ##########

############_###### (###/########.##)

```
def add_switch(dpid, ports)
  ports.each { |each| add_port(each) }
  maybe_send_handler :add_switch, dpid, self
end

private

def maybe_send_handler(method, *args)
```

```
  @observers.each do |each|
    if each.respond_to?(:update)
      each.__send__ :update, method, args[0..-2], args.last
    end
    each.__send__ method, *args if each.respond_to?(method)
  end
end
```

```
################################################ delete_switch ############
####################################
```

```
############_###### (###/########.##)
```

```
def delete_switch(dpid)
  delete_port(@ports[dpid].pop) until @ports[dpid].empty?
  @ports.delete dpid
  maybe_send_handler :delete_switch, dpid, self
end

def delete_port(port)
  @ports[port.dpid].delete_if { |each| each.number == port.number }
  maybe_send_handler :delete_port, Port.new(port.dpid, port.number), self
  maybe_delete_link port
end

private

def maybe_delete_link(port)
  @links.each do |each|
    next unless each.connect_to?(port)
    @links -= [each]
    port_a = Port.new(each.dpid_a, each.port_a)
    port_b = Port.new(each.dpid_b, each.port_b)
    maybe_send_handler :delete_link, port_a, port_b, self
  end
end
```

## 15.5. ###

```
#######################################################################
```

- #### #############
- ############ ######## ###############
- #########################

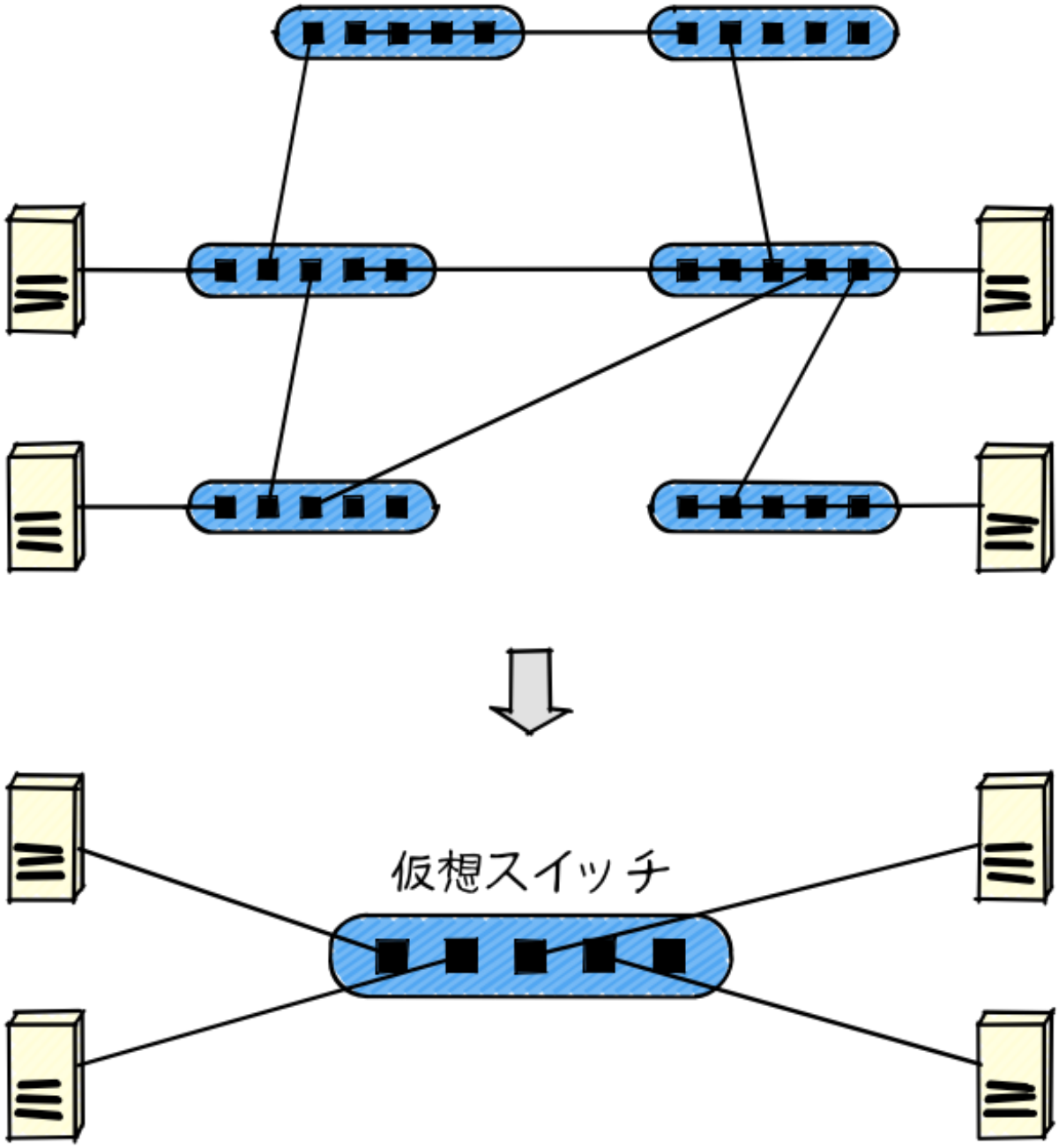
###################################### #2 ################################## ####

# ####### 16. ##############

##################################################

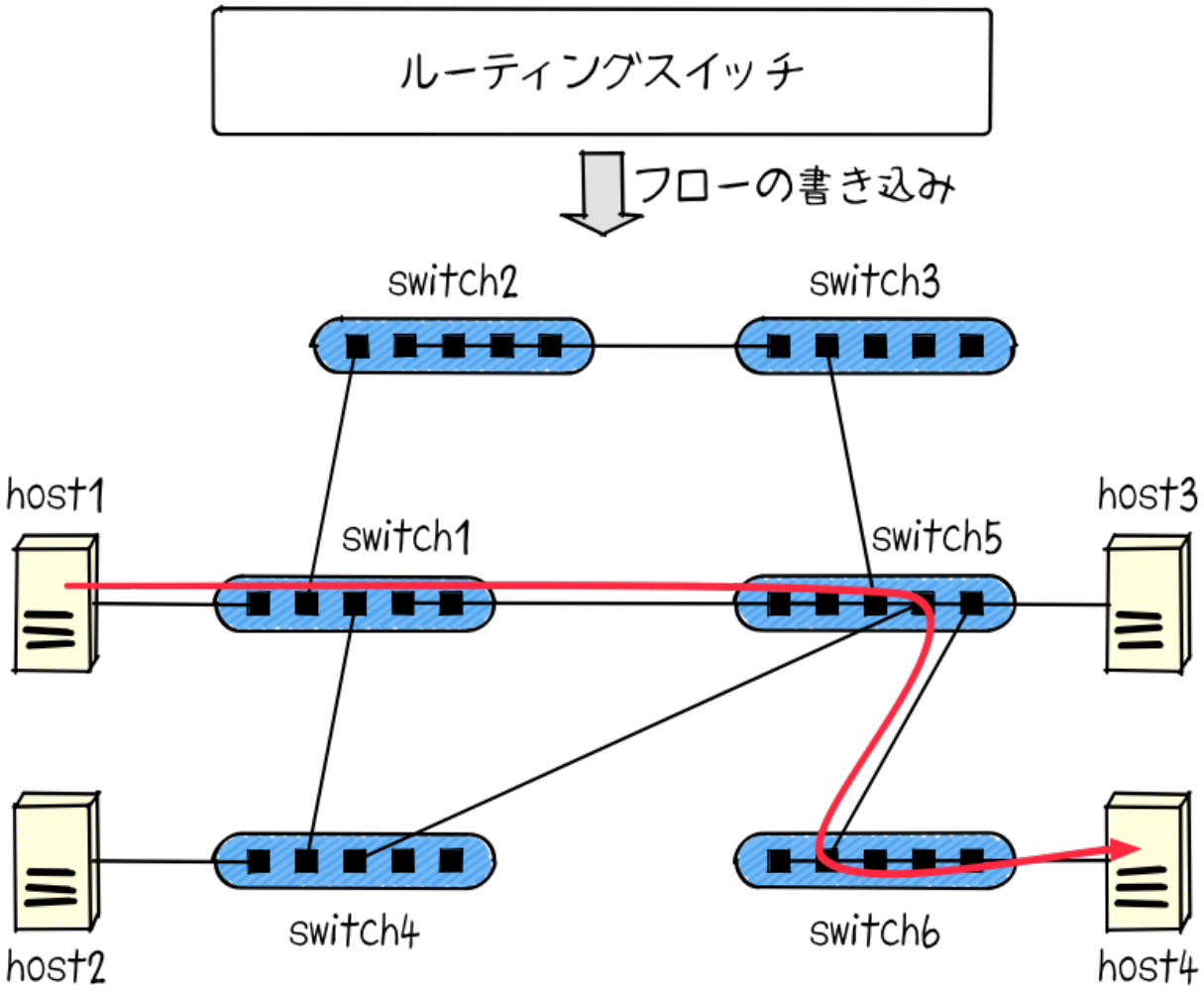
## 16.1. ############

##### ######## ##################################################### ######## ######## 1 ######################################### (# 16#1)################## ######### 7 ### 8 ############################################################## ############### ######## ######### 1 ################################ ######## ################## 1 ##############




###### 16.1. ################ ######## ######## 1 ################

#################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################################

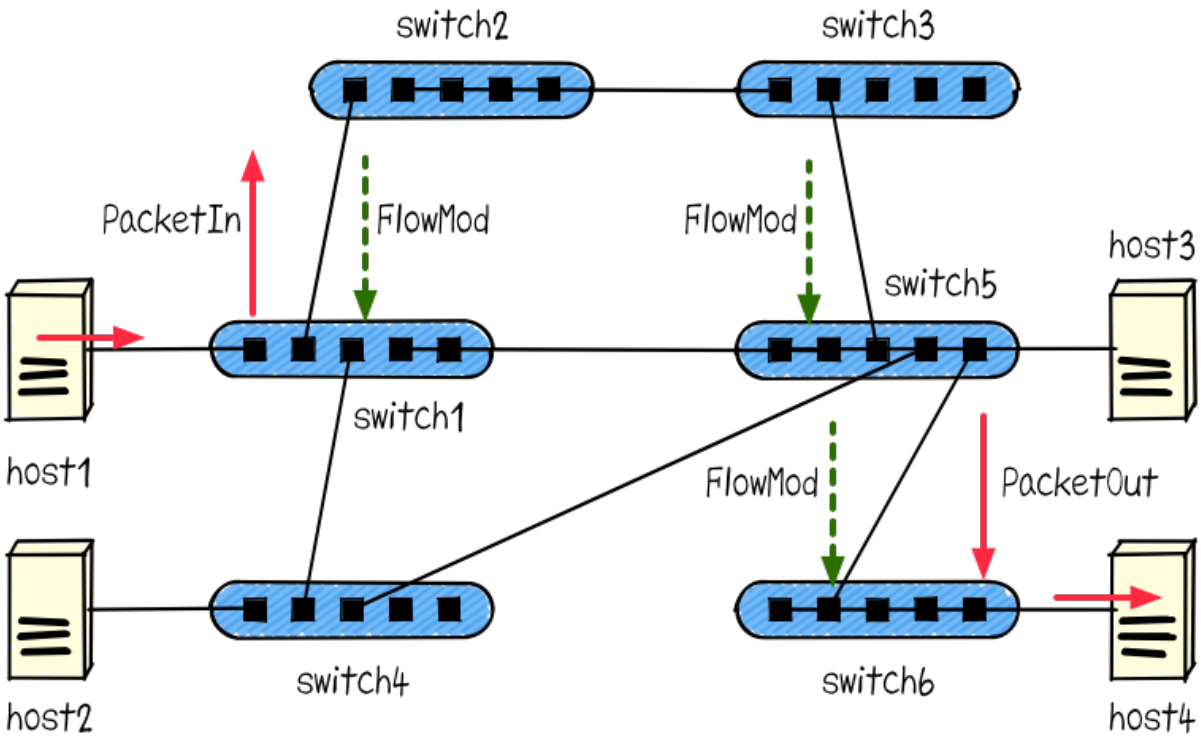



## ###### 16.2. ##########################

#####16#2######## 1 ##### 4 ############################################ 1 → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### 4 ########################################### ###### 1, 5, 6 ############

############################## ######## ######16#3########:

1. ### 1 #### 4 ############################### ###### ## ####### 1 ###### (## ###### ## # ##_#### #### # ###)
2. ############################ (#14#) ########### 4 ######### (#### 6) ###### (### # ###) ###
3. ### # ######## # ############################ # → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### # ########
4. ########################################################## #### ### ###
5. ###### ## ################################## 6 #### # # ###### ### ###




### ###### 16.3. ######################## ######## #####

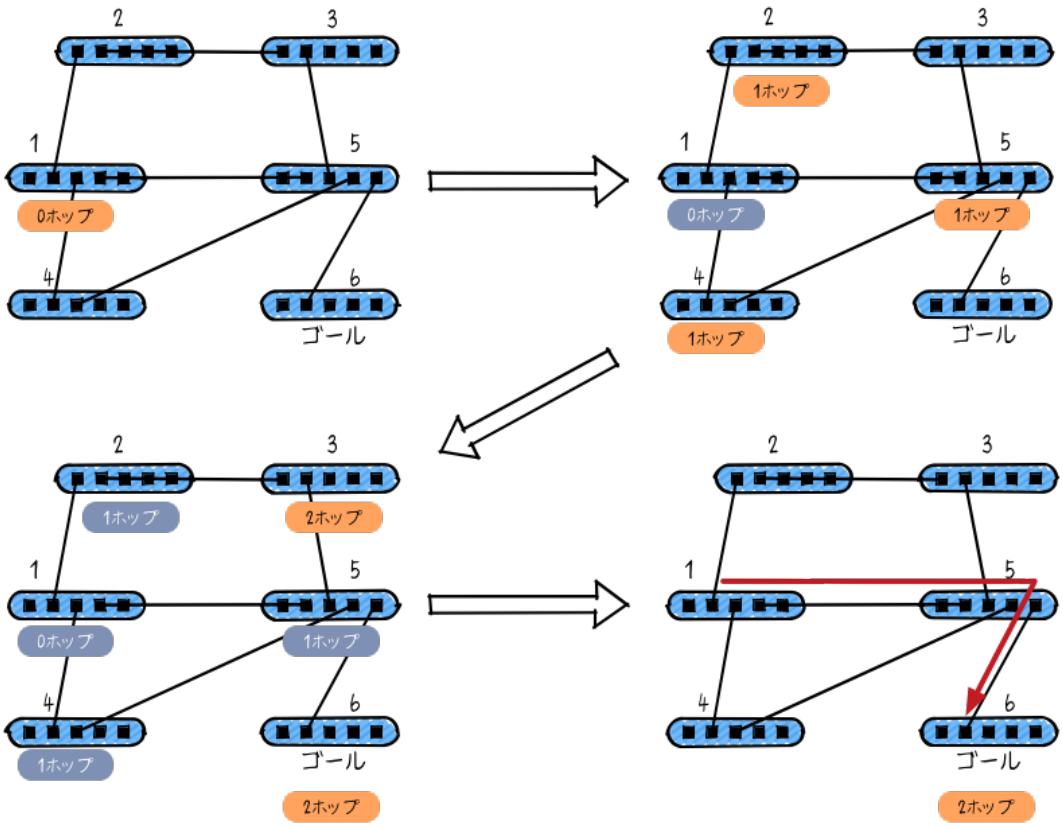
######## ######## ################### ###### ## # #### ###, ###### ### ########## ############ 3 ##############################

## 16.2. #########

################################################################## 1 ###### ##########################

################################################ 1 ########################## ############## 1 ######################## 2 ################################## ## 3 #### 4 ###……#################################################################### ###############[1]

[1] ##################################################################################1########## ############




### ###### 16.4. ################

#### 16#2 ########### 1 ###### 6 ######################## 16#4 ########:

1. ######### 1 # 0 ######
2. #### 1 ## 1 ########################### 1 #################### 2, 4, 5 ###
3. ####### 2 ########### 1 ######################## 3, 6 #################### 2 ########
4. #### 3 ######### 6 ############################ 1 → #### 5 → #### 6 ####

## 16.3. #######

################################################################################## ################################

```
$ git clone https://github.com/trema/routing_switch.git
```

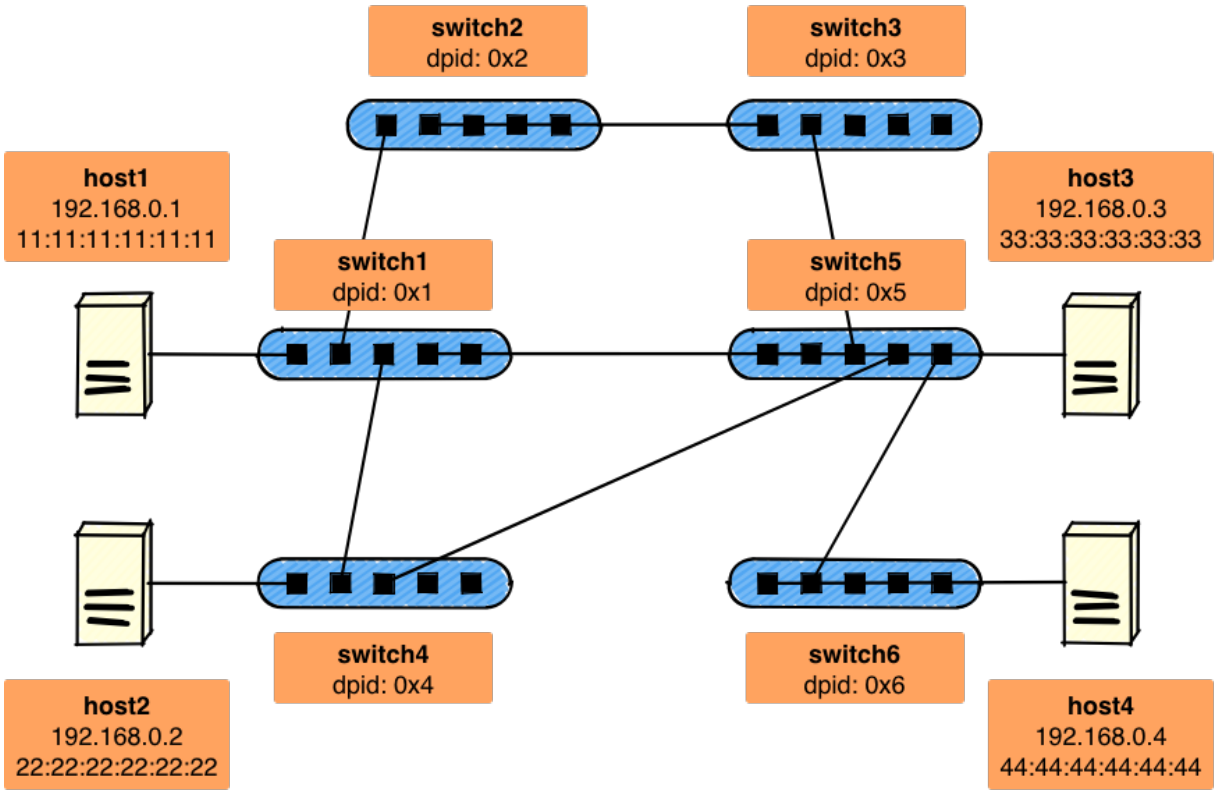
#### ### ############## `bundle install` #######

```
$ cd routing_switch
$ bundle install --binstubs
```

###########

## 16.3.1. ##############

############################## ####################### 16#5 #############




###### 16.5. ### 4 ###### 6 ###########

########################################## (trema.conf)#######################
###############

```
$ ./bin/trema run ./lib/routing_switch.rb -c trema.conf
```

## 16.3.2. ####################

## ####1 # ####4 ##########################################################
##### ### #####################1 ## ####4 ##################################
##########################################

```
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host4
```

```
$ ./bin/trema send_packets --source host4 --dest host1
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host4
```

########################## ####4 → ####1 # ####1 → ####4 # 2 ################ ################

```
Creating path: 44:44:44:44:44:44 -> 0x6:1 -> 0x6:2 -> 0x5:5 -> 0x5:2 -> 0x1:4 -> 0x1:1 -> 11:11:11:11:11:11
Creating path: 11:11:11:11:11:11 -> 0x1:1 -> 0x1:4 -> 0x5:2 -> 0x5:5 -> 0x6:2 -> 0x6:1 -> 44:44:44:44:44:44
```

######################################## trema dump_flows ########## ####1 # # ####4 ######## ######1, ######5, ######6 ####################

```
$ ./bin/trema dump_flows switch1
cookie=0x0, duration=8.949s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=8,
 priority=65535,udp,in_port=4,vlan_tci=0x0000,dl_src=44:44:44:44:44:44,dl_dst=11:11:11:11:11:11,nw_src=192.168.0.4,nw_dst
 actions=output:1
cookie=0x0, duration=4.109s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=4,
 priority=65535,udp,in_port=1,vlan_tci=0x0000,dl_src=11:11:11:11:11:11,dl_dst=44:44:44:44:44:44,nw_src=192.168.0.1,nw_dst
 actions=output:4
$ ./bin/trema dump_flows switch5
cookie=0x0, duration=14.230s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=14,
 priority=65535,udp,in_port=5,vlan_tci=0x0000,dl_src=44:44:44:44:44:44,dl_dst=11:11:11:11:11:11,nw_src=192.168.0.4,nw_dst
 actions=output:2
cookie=0x0, duration=9.320s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=9,
 priority=65535,udp,in_port=2,vlan_tci=0x0000,dl_src=11:11:11:11:11:11,dl_dst=44:44:44:44:44:44,nw_src=192.168.0.1,nw_dst
 actions=output:5
$ ./bin/trema dump_flows switch6
cookie=0x0, duration=18.688s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=18,
 priority=65535,udp,in_port=1,vlan_tci=0x0000,dl_src=44:44:44:44:44:44,dl_dst=11:11:11:11:11:11,nw_src=192.168.0.4,nw_dst
 actions=output:2
cookie=0x0, duration=13.723s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, idle_age=13,
 priority=65535,udp,in_port=2,vlan_tci=0x0000,dl_src=11:11:11:11:11:11,dl_dst=44:44:44:44:44:44,nw_src=192.168.0.1,nw_dst
 actions=output:1
```

#### ######1, ######5, ######6 #############1 # ####4 ## 2 ################### ####

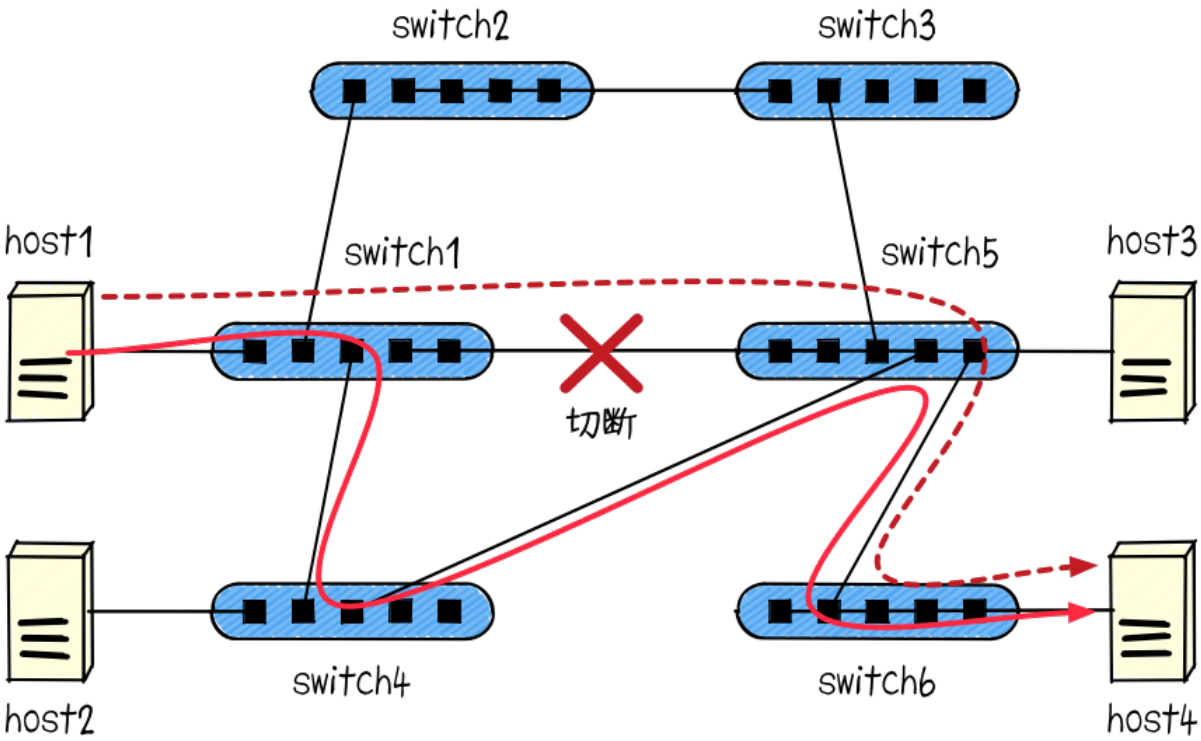
############ ######2, ######3, ######4 ################################

```
$ ./bin/trema dump_flows switch2

$ ./bin/trema dump_flows switch3
```

```
$ ./bin/trema dump_flows switch4
```

### 16.3.3. ############

################################################# 16#5 ###########1 # ######5 # ##################################### (####1 ⇔ ######1 ⇔ ######5 ⇔ ######6 ⇔ ####4) ##################### ####1 # ####2 ################################ ## (####1 → ######1 → ######4 → ######5 → ######6) ##### (# 16#6)#




### ###### 16.6. #########

############################## trema delete_link #######

```
$ ./bin/trema delete_link switch1 switch5
```

########################## ####1 ⇔ ####4 # 2 ###########################

```
Deleting path: 44:44:44:44:44:44 -> 0x6:1 -> 0x6:2 -> 0x5:5 -> 0x5:2 -> 0x1:4 -> 0x1:1 -> 11:11:11:11:11:11
Deleting path: 11:11:11:11:11:11 -> 0x1:1 -> 0x1:4 -> 0x5:2 -> 0x5:5 -> 0x6:2 -> 0x6:1 -> 44:44:44:44:44:44
```

#### ####1 ## ####4 ###############

```
$ ./bin/trema send_packets --source host1 --dest host4
```

############################## ####1 → ####4 ################

```
Creating path: 11:11:11:11:11:11 -> 0x1:1 -> 0x1:3 -> 0x4:2 -> 0x4:3 -> 0x5:4 -> 0x5:5 -> 0x6:2 -> 0x6:1 ->
 44:44:44:44:44:44
```

#####################################################

## 16.4. ################

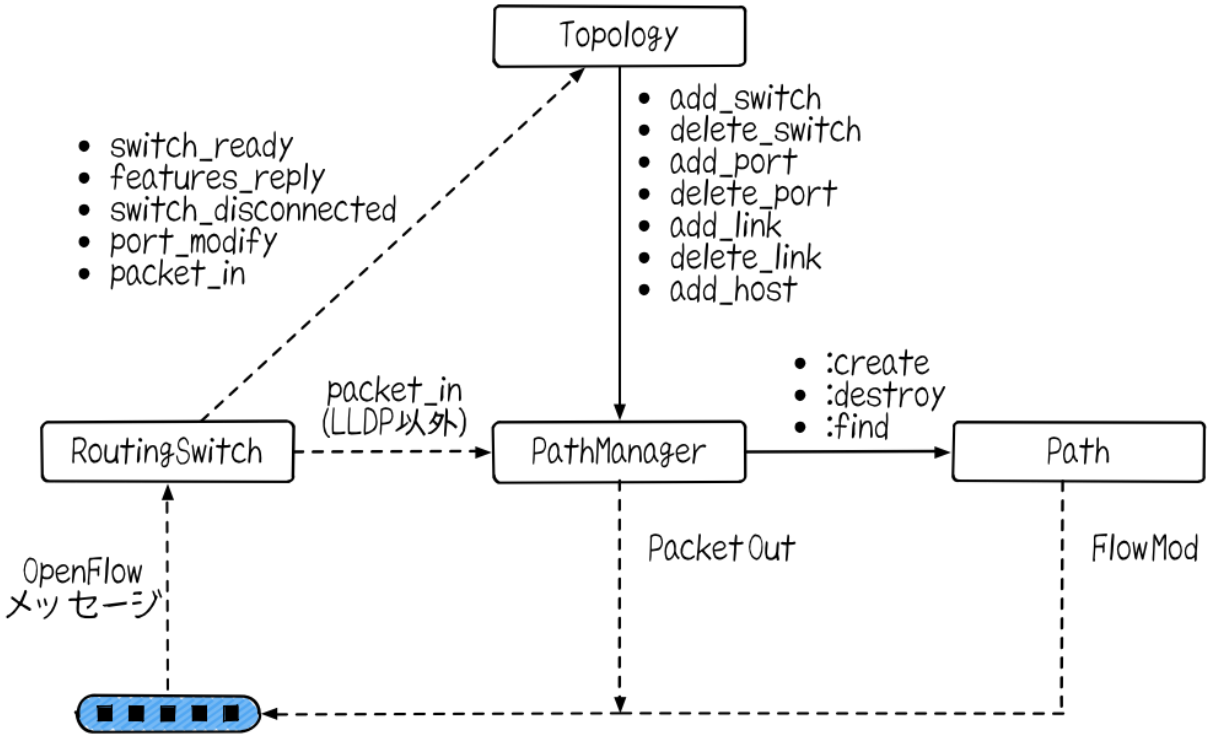
############# 4 ############### (# 16#7)#

```
############# ###
    ######## ######## ##################### ##################### ######## ####
    ########## ######## ### ########### ########
```

```
##################, ######## ### (# 14 ####)
    ############    ###########    #####################    ########    ######
    ############# ########################### ########### #####
```

```
########### ###
    ############################## ## ###### ## ################### ###########
    ################# ########################
```

```
#### ###
    ######################################## # ############# #### ######## ####
    ##### ########### #######
```




## ###### 16.7. ################

#################################################### ################
######## ############ ############### #### ###############
########### ################################################################
#########################[2]#

## 16.4.1. ############# ########## (#######_######.##)

############# ############### ######## ####################

### ###/#######_######.##

```
delegate :switch_ready, to: :@topology
delegate :features_reply, to: :@topology
delegate :switch_disconnected, to: :@topology
delegate :port_modify, to: :@topology

def packet_in(dpid, packet_in)
  @topology.packet_in(dpid, packet_in)
  @path_manager.packet_in(dpid, packet_in) unless packet_in.lldp?
end
```

[2] # 16 ##############################################

#### ######## #### ######_##### ########### delegate ######## ######## ######## ### switch_ready ############# ######_## ##### ######## # ########### ########### ###########_## ################ ######_## ####################

## 16.4.2. ########### ####### (####_#######.##)

########### ########## ################################################################################(################/#########)############## ########### ########################

### ########### ################ (###/####_#######.##)

```
def add_port(port, _topology)
  @graph.add_link port.dpid, port
end

def delete_port(port, _topology)
  @graph.delete_node port
end

# TODO: update all paths
def add_link(port_a, port_b, _topology)
  @graph.add_link port_a, port_b
end

def delete_link(port_a, port_b, _topology)
  @graph.delete_link port_a, port_b
  Path.find { |each| each.link?(port_a, port_b) }.each(&:destroy)
end

def add_host(mac_address, port, _topology)
  @graph.add_link mac_address, port
end
```

########### ######################### @graph ############################## ############################## ######### add_link # ########### ######### ########### ############# @graph #######

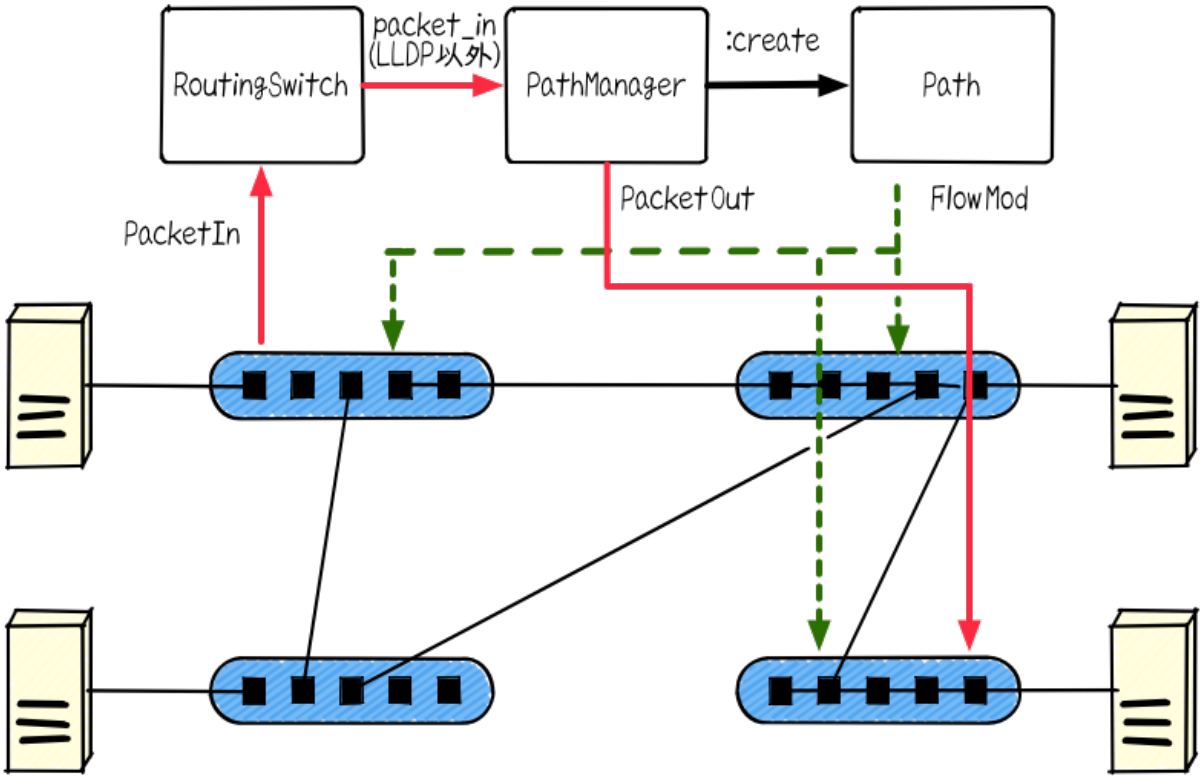
########### # packet_in #########################

### ##################_##

```
def packet_in(_dpid, packet_in)
  path = maybe_create_shortest_path(packet_in)
```

```
  ports = path ? [path.out_port] : @graph.external_ports
  ports.each do |each|
    send_packet_out(each.dpid,
                    raw_data: packet_in.raw_data,
                    actions: SendOutPort.new(each.number))
  end
end

def maybe_create_shortest_path(packet_in)
  shortest_path =
    @graph.dijkstra(packet_in.source_mac, packet_in.destination_mac)
  return unless shortest_path
  Path.create shortest_path, packet_in
end
```

packet_in ######## 16#6 #####:




## ###### 16.8. ########### ####

1. ##########→##################################################
   Path.create ###

2. ##################################################################
   ########## (############) ############

### 16.4.3. #### ####### (####.##)

#### ################################################### Path.create ####### ########:

#### .###### (###/#### .##)

```
def self.create(shortest_path, packet_in)
  new.save(shortest_path, packet_in).tap { |new_path| all << new_path }
end

def save(full_path, packet_in)
  @full_path = full_path
  @packet_in = packet_in
  logger.info 'Creating path: ' + @full_path.map(&:to_s).join(' -> ')
  flow_mod_add_to_each_switch
  self
end

def flow_mod_add_to_each_switch
  path.each_slice(2) do |in_port, out_port|
    send_flow_mod_add(out_port.dpid,
                      match: exact_match(in_port.number),
                      actions: SendOutPort.new(out_port.number))
  end
end
```

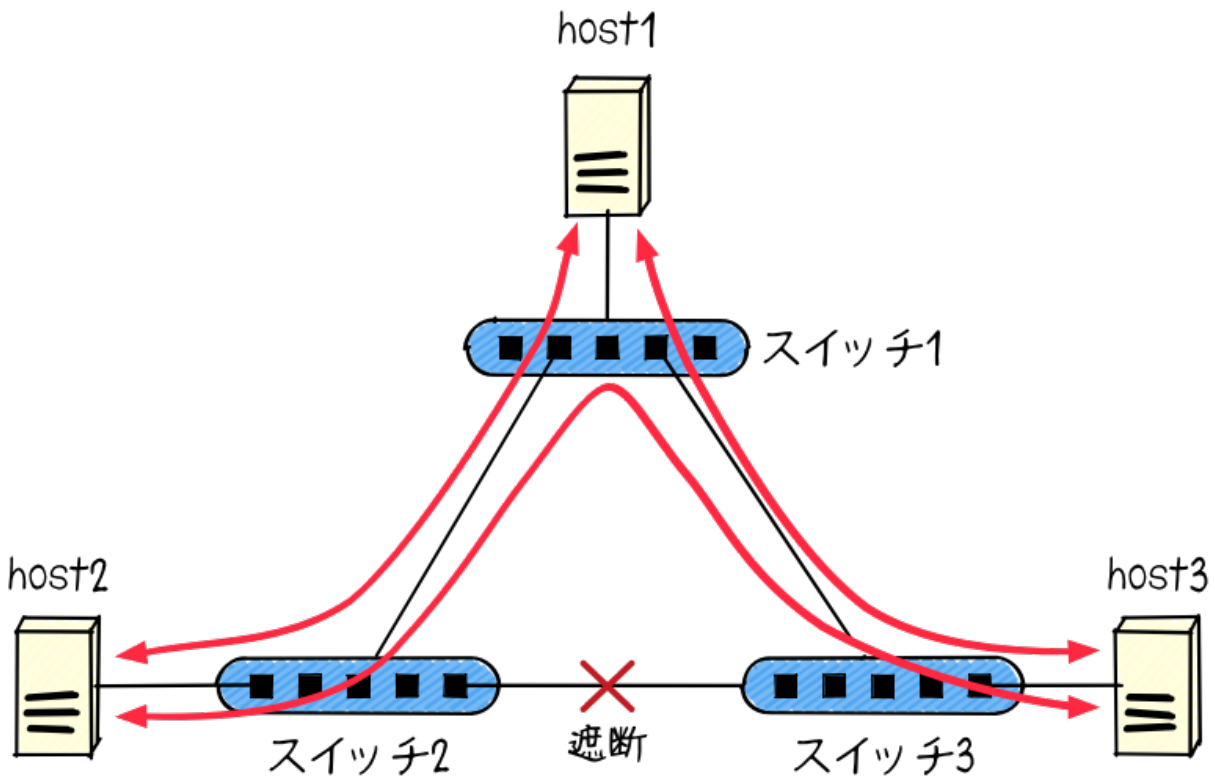
########### # Path.create ####### Path ############## save ######## save ####### ############### flow_mod_add_to_each_switch #################

## 16.5. ######## #####

########################## ######## ####### 1 ############################### ################ ######## ############? ######################## ############ #############

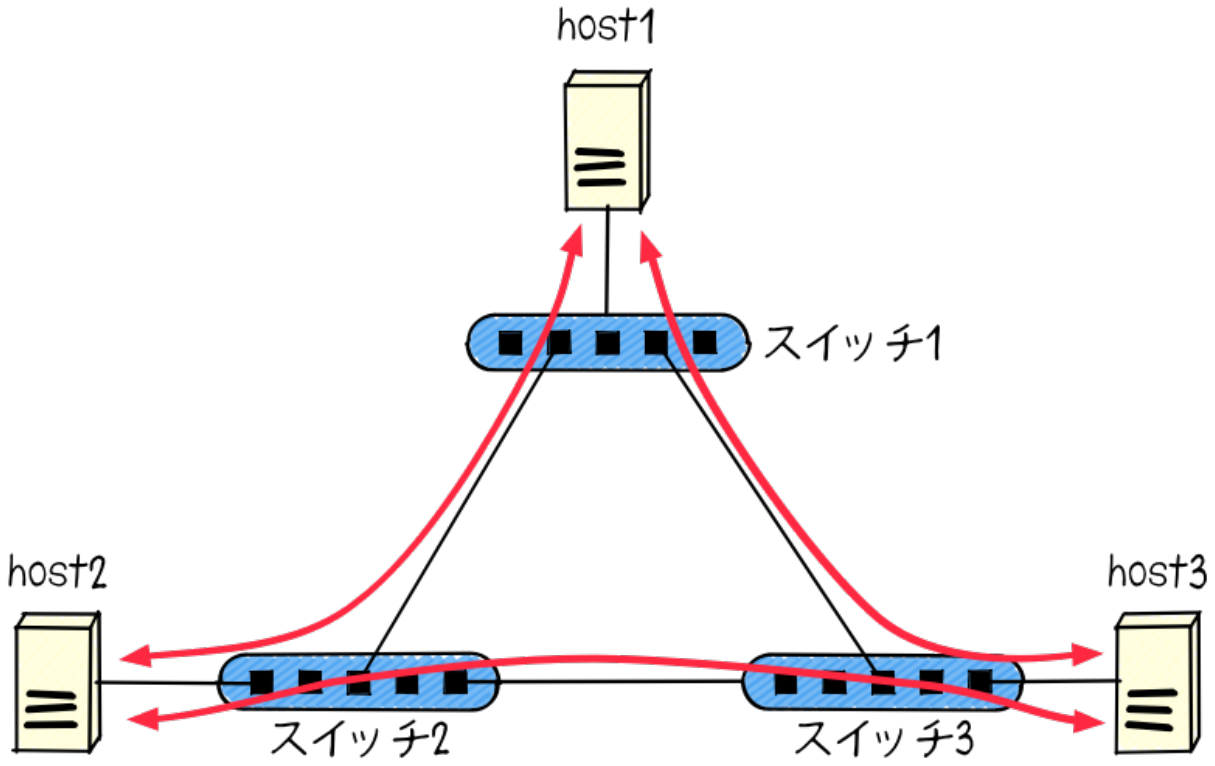
### 16.5.1. ##############

################################################################## 16#7## ##################################2#####3################################ #2#####3################################1################################ ############




## ###### 16.9. ################################

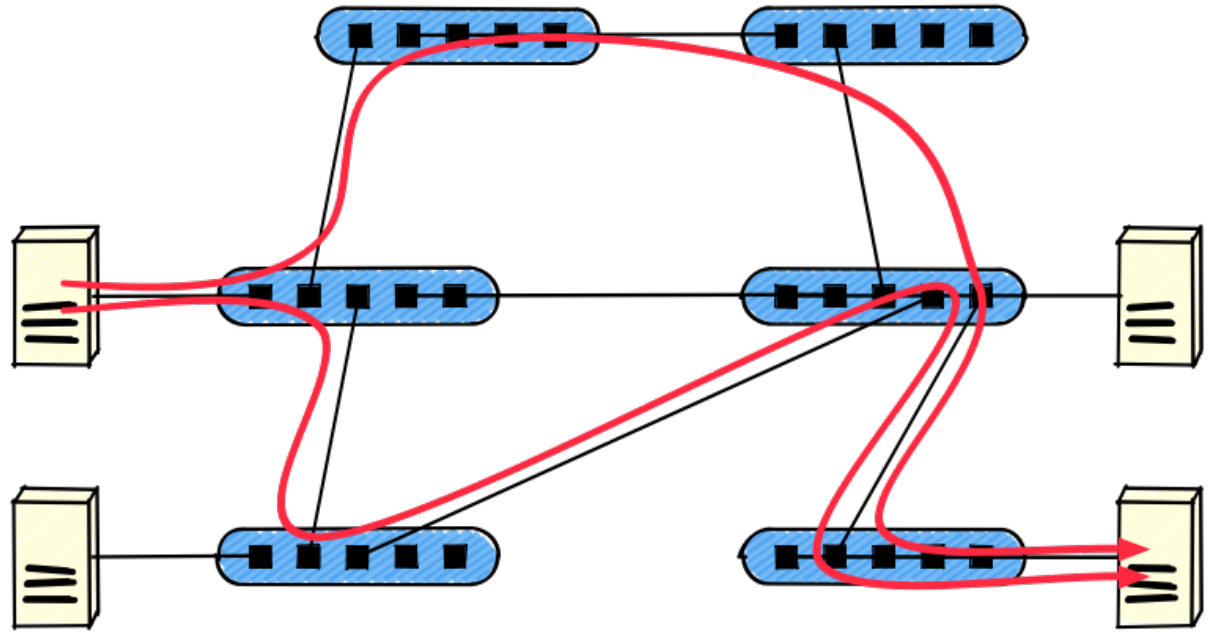
#################################################################
#################################################################
############### 16#8##




###### 16.10. ##############################

## 16.5.2. ####################

#################################################################
########################## 16#9#########################################
######



###### 16.11. ##################################

################################################################
############ ## #### ## ####### #### ####### ############
#### ##########################################################[3]###############
############################1####################

## 16.6. ###

#################################################################

- ##############################################################
- ##############################################################
- ################################################################

#######################################################################

### 16.6.1. ####

- ########################### ############## ########### ###############
  ######################################################################
  ##################################
- ##########/## ########### ###### ######
  ######3##############################################1##################
  ##################################

[3] ########################## #### ###############

# ####### 17. ##############

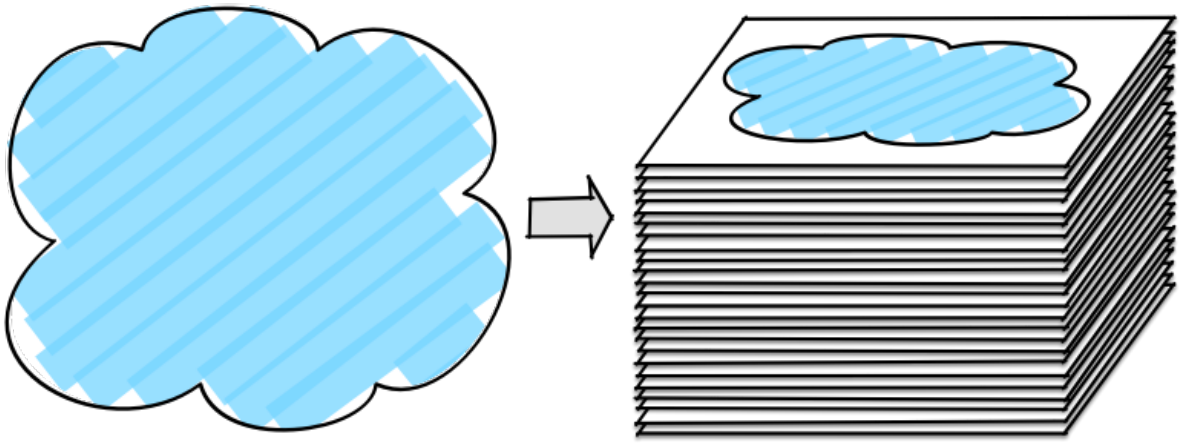
#### (############## ## # #######) ################ ######## ########## 16 ####
##################

## 17.1. ################

######################################## #### ##############################
## (####) ##################################################################
###

#################################### ######## ########################
##### ##########################################################################
######################### ######## ######################### 2 ################
######### + ############################

############################################ (# 17#1)########################
#########################################################



###### 17.1. ############# 1 ##################################

## 17.2. #########

################## ########### ############ ### ##################### #### ###
#### ## ################################

######## ########### 4094 ##############################################
###### ############################

## ######## ######################################## #### ####################
######## ######## ################################

############ ######## #################15################################
########################### ######### ####################################
### ###########/#############

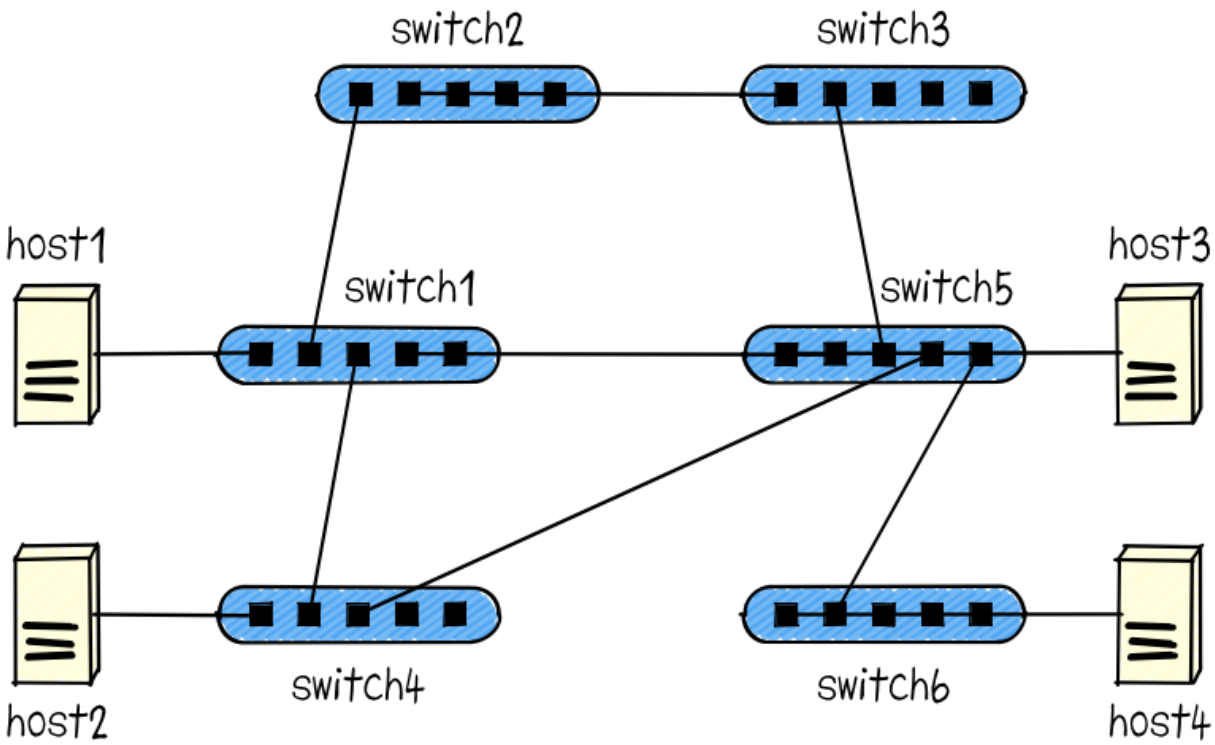
## 17.3. ######

#######################################################################
#######################################################

```
$ git clone https://github.com/trema/routing_switch.git
$ cd routing_switch
$ bundle install --binstubs
```

### 17.3.1. ##################

################################ ##### ##################### 17#2 #############
########################### ( trema.conf ) #######################




###### 17.2. ########################

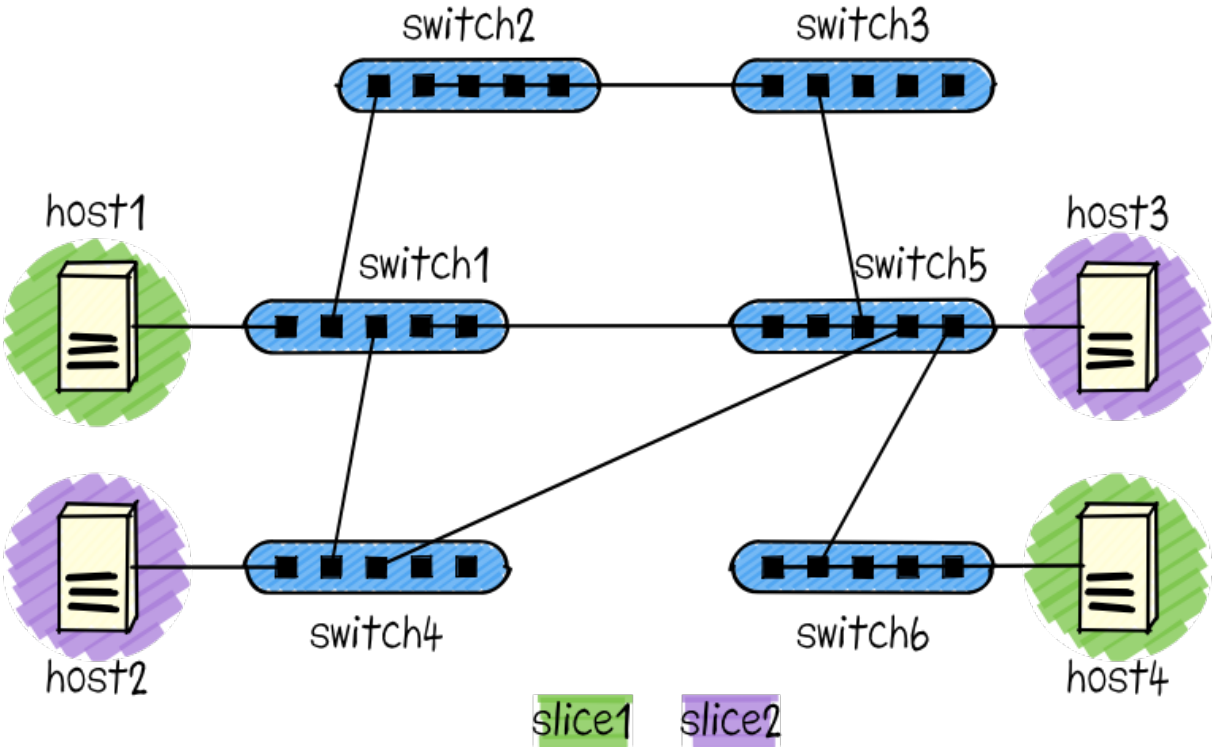
########################## trema run # -- --slicing #############:

```
$ ./bin/trema run ./lib/routing_switch.rb -c trema.conf -- --slicing
```

##############################################

### 17.3.2. #######

######### slice #########2 ###### slice1 # slice2 ######### 2 ################ (#17#3)#




### ###### 17.3. ########

######## slice add ######:

```
$ ./bin/slice add slice1
$ ./bin/slice add slice2
```

slice add_host #################### host1 # host4 ##### ### ##### slice1 ## host2 # host3 # slice2 ############

```
$ ./bin/slice add_host --port 0x1:1 --mac 11:11:11:11:11:11 --slice slice1
$ ./bin/slice add_host --port 0x6:1 --mac 44:44:44:44:44:44 --slice slice1
$ ./bin/slice add_host --port 0x4:1 --mac 22:22:22:22:22:22 --slice slice2
$ ./bin/slice add_host --port 0x5:1 --mac 33:33:33:33:33:33 --slice slice2
```

##########################################

## 17.3.3. #########

######################## 2 ##### ## ###

1. ######################
2. ########################

############## trema send_packet # trema show_stats ########################## slice1 ####### host1 # host4 ########################## 1 ################### # 1 ###################

```
$ ./bin/trema send_packet --source host1 --dest host4
$ ./bin/trema send_packet --source host4 --dest host1
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.4 = 1 packet
Packets received:
  192.168.0.4 -> 192.168.0.1 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host4
Packets sent:
  192.168.0.4 -> 192.168.0.1 = 1 packet
Packets received:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.4 = 1 packet
```

#######################################################

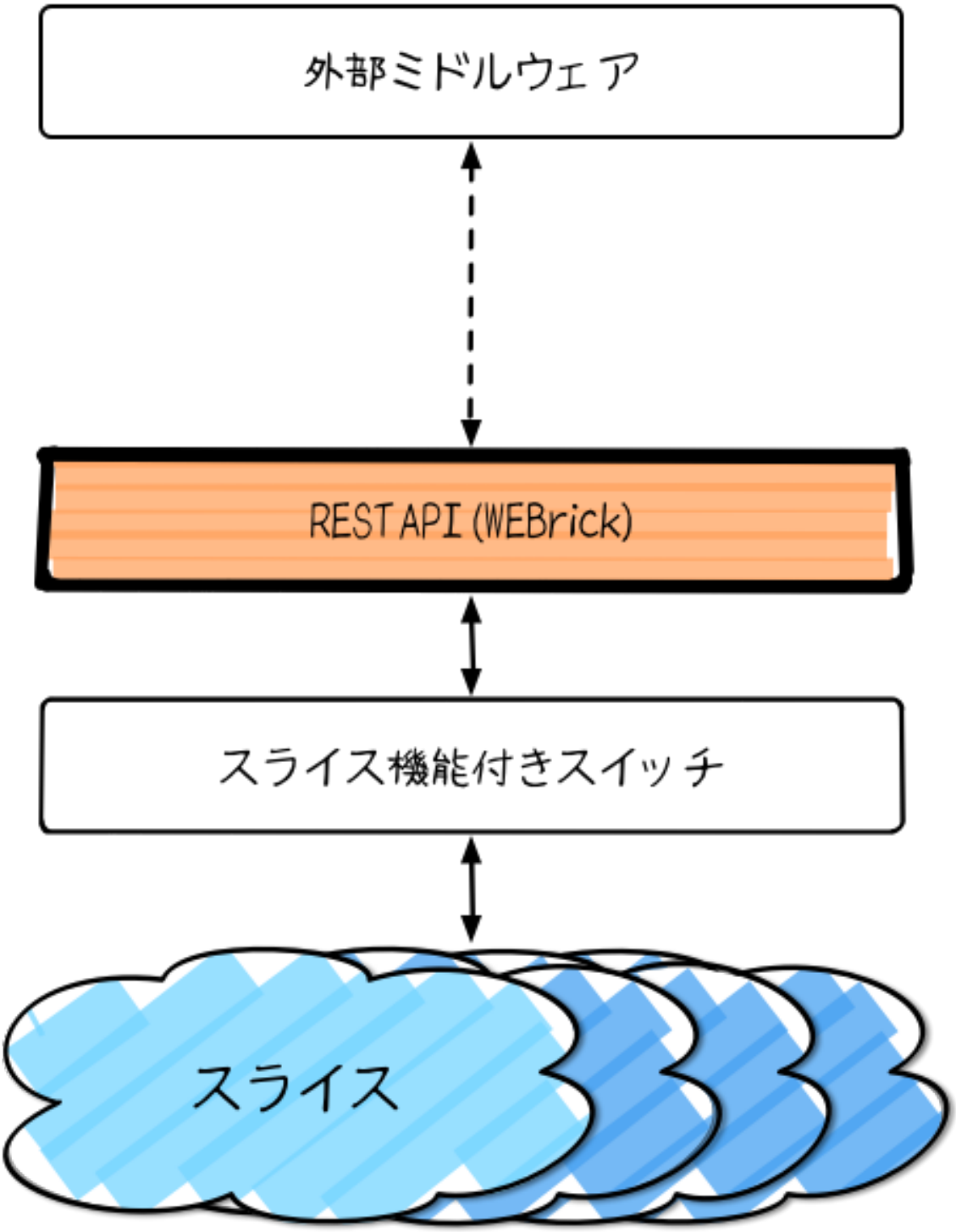
```
$ ./bin/trema reset_stats host1
$ ./bin/trema send_packet --source host1 --dest host2
$ ./bin/trema send_packet --source host2 --dest host1
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host2
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
```

##### slice1 # host1 ## slice2 # host2 ##################1 ######### 2 ######## ########################

## 17.4. #### ### ###

############# ######### ################# #### ### ############# ### ########## ##########################################################

############# #### ### # #### # #### ######### ####### ###### ##17#4)######## ### ########################## #### ############ ################################ ########################### #### ### ##########




## ###### 17.4. ############# #### ### ##

#### ### ################################ rackup ##### ####### #######

```
$ ./bin/trema run ./lib/routing_switch.rb -c trema.conf -d -- --slicing
$ ./bin/rackup
```

########### #### ### ##########

## 17.4.1. #### ### ########

#### ### ######################## #### # #### #### # #### ############ ######_##### ############ #### ########

```
{"name": "yutaro_slice"}
```

#### #### # /###### ### ### # #### #### ########## curl ################ #### #### ########### #### ###### ####### ############## 9292 ###

```
$ curl -sS -X POST -d '{"name": "yutaro_slice"}' 'http://localhost:9292/slices' -H Content-Type:application/
json -v
```

###################### #### ######## 201 ########

```
* Hostname was NOT found in DNS cache
*   Trying 127.0.0.1...
* Connected to localhost (127.0.0.1) port 9292 (#0)
> POST /slices HTTP/1.1
> User-Agent: curl/7.35.0
> Host: localhost:9292
> Accept: */*
> Content-Type:application/json
> Content-Length: 21
>
* upload completely sent off: 21 out of 21 bytes
< HTTP/1.1 201 Created ❶
< Content-Type: application/json
< Content-Length: 21
* Server WEBrick/1.3.1 (Ruby/2.0.0/2014-10-27) is not blacklisted
< Server: WEBrick/1.3.1 (Ruby/2.0.0/2014-10-27)
< Date: Mon, 30 Mar 2015 08:15:22 GMT
< Connection: Keep-Alive
<
* Connection #0 to host localhost left intact
{"name": "yutaro_slice"}
```

❶ ########### #### ######## 201

## 17.4.2. ##############

################################################## #### ############## ### ################## ### ### `/slices/:slice_id/ports/:port_id/mac_addresses` # #### #### ################## `yutaro_slice` # #### = 0#1, ##### = 1, ### #### = 11:11:11:11:11:11 ########################

```
$ curl -sS -X POST -d '{"name": "11:11:11:11:11:11"}' 'http://localhost:9292/slices/yutaro_slice/ports/0x1:1/mac_addresses' -H Content-Type:application/json -v
```

################ #### ######## 201 ############

```
[{"name": "11:11:11:11:11:11"}]
* Hostname was NOT found in DNS cache
*   Trying 127.0.0.1...
* Connected to localhost (127.0.0.1) port 9292 (#0)
> POST /slices/foo/ports/0x1:1/mac_addresses HTTP/1.1
> User-Agent: curl/7.35.0
> Host: localhost:9292
> Accept: */*
> Content-Type:application/json
> Content-Length: 29
>
} [data not shown]
* upload completely sent off: 29 out of 29 bytes
< HTTP/1.1 201 Created ❶
< Content-Type: application/json
< Content-Length: 31
* Server WEBrick/1.3.1 (Ruby/2.0.0/2014-10-27) is not blacklisted
< Server: WEBrick/1.3.1 (Ruby/2.0.0/2014-10-27)
< Date: Tue, 31 Mar 2015 00:20:45 GMT
< Connection: Keep-Alive
<
{ [data not shown]
* Connection #0 to host localhost left intact
```

❶ ########## #### ######## 201

### 17.4.3. ##########

############################ /slices/:slice_id/ports # #### ### ################## ######################### slice_yutaro #################[1] #

```
$ curl -sS -X GET 'http://localhost:9292/slices/yutaro_slice/ports'
[{"name": "0x1:1", "dpid": 1, "port_no": 1}]
```

######### yutaro_slice ###### 0x1 #### 1 #################### host1 #### /slices/:slice_id/ports/:port_id/mac_addresses ########

```
$ curl -sS -X GET 'http://localhost:9292/slices/yutaro_slice/ports/0x1:1/mac_addresses'
[{"name": "11:11:11:11:11:11"}]
```

## 17.5. #### ### ##

#### ### ########### ### ######## (# 17#1)####### #### ########### #####://#########.###/#####/##############/####/######## ############################ #####

#### 17.1. # 17#1: #### ### ##

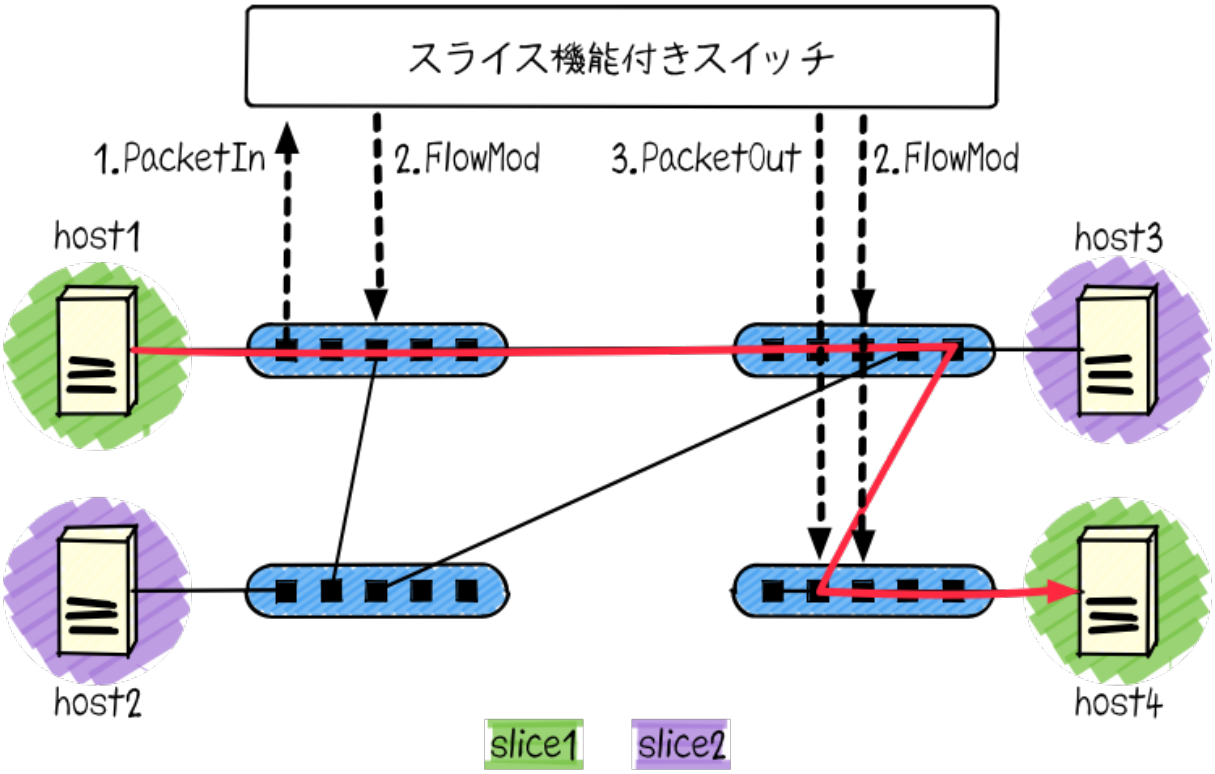
| ## | #### | ### |
|---|---|---|
| ####### | #### | /slices |
| ####### | ###### | /slices/:slice_id |
| ####### | ### | /slices |
| ######### | ### | /slices/:slice_id |
| ###### | #### | /slices/:slice_id/ports |
| ###### | ###### | /slices/:slice_id/ports/:port_id |
| ###### | ### | /slices/:slice_id/ports |
| ######## | ### | /slices/:slice_id/ports/:port_id |

[1] curl ################## ( -v ) ########

| ## | #### | ### |
|---|---|---|
| ### ####### | #### | /slices/:slice_id/ports/:port_id/mac_addresses |
| ### ####### | ###### | /slices/:slice_id/ports/:port_id/mac_addresses/:mac_address_id |
| ### ####### | ### | /slices/:slice_id/ports/:port_id/mac_addresses |

## 17.6. ###############

##########15#################################################################
##########################17#5##




###### 17.5. ###############

1. ### 1 #### 4 ################################ ###### ## ####### 1 ###### (## ###### ## # ##_#### #### # ###)
2. ############################ (#14#) ########### 4 ######### (#### 6) ###### (### # ###) ###

3. ### # #### # ##################################################
4. ### # ######## # ############################ # → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### # ########
5. ########################################################## #### ### ###
6. ###### ## ################################## 6 # ###### ### (### #) ###

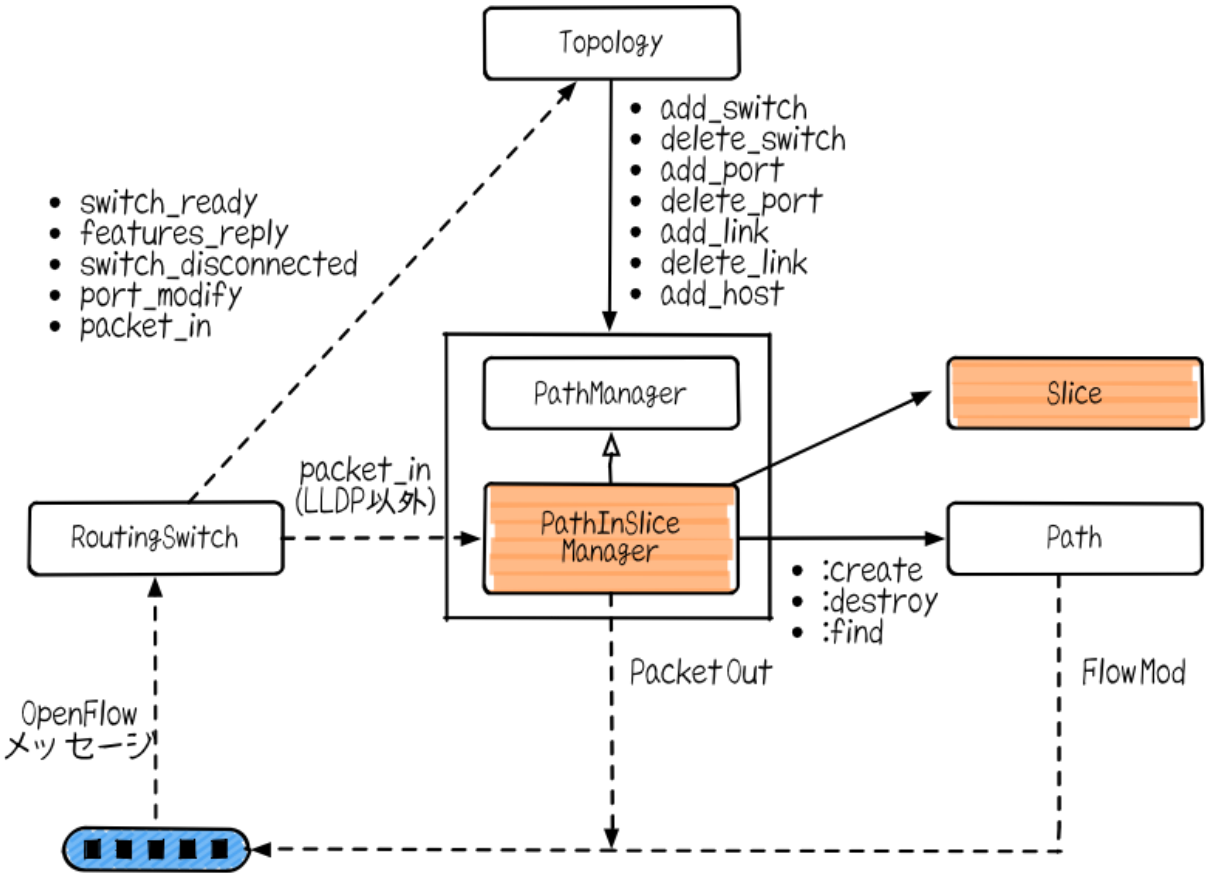
################################## 3 ############### 3 ##################### ################################################################

## 17.7. ####################

########################### 2 ################ (# 17#6)#

################## ###
    #####################

##### ###
    #########




### ###### 17.6. ####################

### 17.7.1. ################## ###

################## #### packet_in ######################################### ### ########## ########################### # ########## #### packet_in ##### #############

#########################_##

```
def packet_in(_dpid, packet_in)
  slice = Slice.find do |each|
    each.member?(packet_in.slice_source) &&
    each.member?(packet_in.slice_destination(@graph))
  end
  ports = if slice
          path = maybe_create_shortest_path_in_slice(slice.name, packet_in)
          path ? [path.out_port] : []
        else
          external_ports(packet_in)
        end
  packet_out(packet_in.raw_data, ports)
end
```

###### ## ###### ################## ######################## ################ ####

1. ######## ### ####### ### ##################################### ############# ########################
2. ############################## (################################) # ######### ##########################[2]

#### 1 ###### Slice.find #### (########################) ################## Slice #########

### 17.7.2. ##### ###

##### ################################################################ #######

########## Slice.find ############# ( all ) ###### find ##############

####### (###/#####.##)

[2] ##############################################

```
def self.find(&block)
  all.find(&block)
end
```

########### `Slice.create` ########################################## `Slice.find_by` ###################### `Slice.new` ################### ( `all` ) #######

####### (###/#####.##)

```
def self.create(name)
  if find_by(name: name)
    fail SliceAlreadyExistsError, "Slice #{name} already exists"
  end
  new(name).tap { |slice| all << slice }
end
```

`Slice.destroy` # `create` ########################################## `Slice.find_by!` ########################## ( `Path` ######) ###################### ## `all` #######

####### (###/#####.##)

```
def self.destroy(name)
  find_by!(name: name)
  Path.find { |each| each.slice == name }.each(&:destroy)
  all.delete_if { |each| each.name == name }
end
```

## 17.8. ###

##### ##### ##### ##### ##########################################

- ##################################
- ############################## #######

#### ##### ###### #### # 1 #### ######## ##################################### ######## ##########################################

# ######## #. ### ##############

##########################[1]##############################################
################

#####################################

```
$ curl -sSL https://get.rvm.io | bash -s stable --ruby
```

> ##########.

[1] #####://###.##/

# ######## #. ###########

## #.1. ##### ####

### #.1.1. ##### ###

###########

```
$ ./bin/trema run [########] ##########
```

#### ###

############## trema run ################################### ###:[#### + #] ### ####

```
$ ./bin/trema run hello_trema.rb
```

############### ######## 1.0 ################# 1.3 ########## --openflow13 ##### ######

```
$ ./bin/trema run hello_trema.rb --openflow13
```

######################## trema run # -c ( --conf ) #########################

```
$ ./bin/trema run hello_trema.rb -c trema.conf
```

########################### -d ( --daemonize ) ###########

```
$ ./bin/trema run hello_trema.rb -c trema.conf -d
```

#### ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| -c , --conf | ################### | |
| -d , --daemonize | ###################### | |

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `--openflow13` | ####### ######## 1.3 #### #### | |
| `-L` , `--log_dir` | ################# ( ##### ##.log ) ################# | `/tmp` |
| `-P` , `--pid_dir` | ########### ### #### ( ### ####.pid ) ############## ### | `/tmp` |
| `-S` , `--socket_dir` | ############### ( ###### #.ctl ) ################# | `/tmp` |
| `-l` , `--logging_level` | ###################### ## | `info` |
| `-p` , `--port` | ######################### ### ### ########## | 6653 |

## #.1.2. ##### ####_#####

##########################

```
$ ./bin/trema dump_flows [#########] #####
```

### ###

########### `of_switch` ##############################

#####.####

```
vswitch('of_switch') { datapath_id 0x1 }
```

#########

```
$ ./bin/trema run my_controller.rb -c trema.conf
```

############### `of_switch` ########################## `trema dump_flows of_switch` ######

```
$ ./bin/trema dump_flows of_switch
cookie=0x0, duration=10.727s, table=0, n_packets=0, n_bytes=0, priority=0 actions=drop
```

######### #### ####### # `ovs-ofctl dump-flows` ############ `man ovs-ofctl` # ##### ##### ###### ####

## ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `-S` , `--socket_dir` | ################### ( `### ####.ctl` ) ################ ### `trema run` ##### `-S` , `--socket_dir` ############## ##### | `/tmp` |

## #.1.3. ##### #######

##################### #### ###

```
$ ./bin/trema killall [#########] #######
```

### ###

`trema run` ######################### #### ##### `trema killall` ########### (=###### #####) #########

```
$ ./bin/trema killall HelloTrema
```

##################################### #### ##### `--all` ###########

```
$ ./bin/trema killall --all
```

## ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `-S` , `--socket_dir` | ########### ##### ###### ####### ( `*.ctl` ) ######### ######### `trema run` ##### `-S` , `--socket_dir` ######## ########### | `/tmp` |
| `--all` | ##### ############ #### # # | |

## #.1.4. ##### ####

############################

```
$ ./bin/trema stop [#########] ##
```

### ###

#################################### `trema stop` #########

```
$ ./bin/trema stop switch1
```

### ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `-S` , `--socket_dir` | ##### ############# ( `*.ctl` ) ################ ## `trema run` ##### `-S` , `--socket_dir` ############## ##### | `/tmp` |

## #.1.5. ##### #####

`trema stop` ##########################

```
$ ./bin/trema start [#########] ##
```

### ###

`trema stop` ################################ `trema start` #########

```
$ ./bin/trema start host1
```

### ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `-S` , `--socket_dir` | ##### ############# ( `*.ctl` ) ################ | `/tmp` |

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| | ## `trema run` ##### `-S` , `--socket_dir` ############## ##### | |

## #.1.6. ##### ######_####

#################

```
$ ./bin/trema delete_link [#########] #######1 #######2
```

### ###

########################## 2 ## `trema delete_link` #########

```
$ ./bin/trema delete_link switch1 host2
```

### ###########

| ######### | ## | ###### |
|---|---|---|
| `-S` , `--socket_dir` | ##### ############# ( `*.ctl` ) ################ ## `trema run` ##### `-S` , `--socket_dir` ############## ##### | `/tmp` |

## #.1.7. ##### #####

##########################################

```
$ ./bin/trema netns ############## [####]
```

### ###

########### `host1` , `host2` ###### 2 ##########################################

#####.####

```
vswitch { dpid 0x1 }
```

```
netns('host1') {
  ip '192.168.1.2'
  netmask '255.255.255.0'
  route net: '0.0.0.0', gateway: '192.168.1.1'
}

netns('host2') {
  ip '192.168.1.3'
  netmask '255.255.255.0'
  route net: '0.0.0.0', gateway: '192.168.1.1'
}

link '0x1', 'host1'
link '0x1', 'host2'
```

#########

```
$ ./bin/trema run my_controller.rb -c trema.conf
```

################# host1 ############# trema netns ############################ ####### exit ### ###:[#### + #] #######

```
$ ./bin/trema netns host1
[sudo] password for yasuhito: (########)
$ ip addr
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
    inet 127.0.0.1/8 scope host lo
       valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 ::1/128 scope host
       valid_lft forever preferred_lft forever
23642: host1: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state UP group
 default qlen 1000
    link/ether 6e:59:cb:51:86:db brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.1.2/24 brd 192.168.1.255 scope global host1
       valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 fe80::6c59:cbff:fe51:86db/64 scope link
       valid_lft forever preferred_lft forever
$ exit
```

##############################################################

```
$ ./bin/trema netns host1 ip link
```

```
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN mode DEFAULT group
 default
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
23642: host1: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state UP mode
 DEFAULT group default qlen 1000
    link/ether 6e:59:cb:51:86:db brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
```

########################################

```
$ ./bin/trema netns host1 -- ping -c1 192.168.1.3
PING 192.168.1.3 (192.168.1.3) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.1.3: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.448 ms

--- 192.168.1.3 ping statistics ---
1 packets transmitted, 1 received, 0% packet loss, time 0ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.448/0.448/0.448/0.000 ms
```

# #.2. ####

## #.2.1. #####(####)

######################### `args` # ##### ### # `--` ###########

### ##

```
def start(args)
  # ...
end
```

######################## `args` #### `['graphviz', '/tmp/topology.png']` ####

#####/######## ######

```
$ ./bin/trema run ./lib/topology_controller.rb -c fullmesh.conf -- graphviz /tmp/topology.png
```

################### `args` ## ( `[]` )#

### #######

#### `start` ########### ##### ### ##############################:

#####/######## # ###/########_##########.## ####

```
def start(args)
  @command_line = CommandLine.new(logger)
  @command_line.parse(args)
  @topology = Topology.new
  @topology.add_observer @command_line.view
  logger.info "#{name} started (#{@command_line.view})."
end
```

################################ CommandLine ############# args ############ ##################

## args ############################## ( _args ) ####################

#####/#####_##### # ###/#####_#####.## ####

```
def start(_args)
  logger.info "#{name} started."
end
```

# ######## #. ########## ### #######

#### #### ## ######## ##### ### ### ####### ###### ####### ####### 3.0:

- ####://###.###.###/########/####3.0.####