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

<yasuhito@gmail.com>

#

#

#

#

#

#

#

#

########

1. #### 1
    1.1. ### 1
    1.2. #### 2
    1.3. ####### 2
    1.4. ##### 3
2. ######## #### 4
    2.1. ########### 4
    2.2. ############### 5
    2.3. ######## ###### 6
        2.3.1. ##### 1: ######## 6
        2.3.2. ######## ####### 8
        2.3.3. ############### 8
        2.3.4. ##### 2: ########### 9
    2.4. ######## ##### 11
        2.4.1. ############### 11
        2.4.2. ##################### 12
        2.4.3. ###################### 12
        2.4.4. ################# 12
    2.5. ############### 13
    2.6. ### 13
3. ######## ### 14
    3.1. ############ 14
    3.2. ################# 14
        3.2.1. ############### 14
        3.2.2. ######## 15
        3.2.3. ##### ######## ## ### 15
        3.2.4. ################# 16
        3.2.5. ####### 17
        3.2.6. ########## 18
        3.2.7. ############## 19
        3.2.8. ############ 20
    3.3. ########## 21
        3.3.1. ### 21
        3.3.2. #### (####) 21
        3.3.3. ###### (##) 22
        3.3.4. #### 22

3.3.5. ######## 22
3.3.6. ######### 24
3.3.7. ###### ##### 25
3.3.8. ######### ##### 26
3.3.9. ########## ##### 29
3.4. ######### 30
3.4.1. ############# # ############# 33
3.4.2. ######## 34
3.5. ### 36
4. #####, #####! 37
4.1. ############## 37
4.2. ####### 38
4.3. ################ 40
4.3.1. ########### 41
4.3.2. ####### ####### 41
4.3.3. #### ############## 41
4.4. #####, #####! 42
4.4.1. ##### ######## 42
4.5. ##### #### 45
4.6. ######## 47
4.6.1. ## 47
4.6.2. ####### 49
4.6.3. ##### 51
4.6.4. ############ 51
4.7. ### 54
4.8. #### 55
5. ######### 56
5.1. ############## 56
5.2. ###### 57
5.3. ####### 57
5.3.1. #########/####### 59
5.4. ######## 60
5.4.1. ############ 61
5.4.2. ######## 62
5.4.3. ############ 63
5.4.4. ################## 63
5.4.5. ############## 65
5.5. ### 65

6. ################ 67
6.1. ############## 67
6.2. ###### 68
6.3. ####### 68
6.4. ######## 69
6.4.1. ######## 69
6.4.2. ######### 70
6.4.3. ######_###### 70
6.4.4. #### ### #### 72
6.5. ########## 77
6.5.1. #### 77
6.6. ######### 80
6.7. ### 82
7. ################ 84
7.1. ################## 84
7.2. ######################### 85
7.3. ####### 86
7.3.1. ########### 87
7.4. ######## 89
7.4.1. ######### 91
7.4.2. ######## 92
7.4.3. ######_######### 93
7.4.4. ##### 93
7.4.5. ###_####_########### 94
7.4.6. ######_####_########### 95
7.4.7. ######_#####, ######_######### 95
7.4.8. ###/#####_##### #### 96
7.5. ### 98
8. ################ 99
8.1. ############# 99
8.2. ############## 100
8.3. ###################(#########)#### 101
8.3.1. ###### ############### 102
8.3.2. ###### ###########(#######) 103
8.3.3. #######(#### ########## ###) 104
8.4. ####### 105
8.5. ################ 107
8.5.1. #######(###### ##)### 108

8.5.2. ###### ### ### 110
8.5.3. ######### 111
8.5.4. ### ### 112
8.5.5. ############# 113
8.6. ### 113
9. ########1.3########## 115
9.1. ########1.0############## 115
9.2. ######### 115
9.2.1. ####### 115
9.2.2. ########1.3 ###### 116
9.2.3. ######### 117
9.3. ########1.3 ## ###### ## 118
9.4. ########1.3############## 118
9.5. ######## 119
9.5.1. ######_##### #### 121
9.5.2. ######_## #### 123
9.6. ### 124
10. ##### ######## 125
10.1. ############# 125
10.2. ######### 126
10.3. ########### 127
10.4. ######### 128
10.5. ############ 128
10.5.1. #####: ################### 129
10.5.2. ####: ####### 132
10.5.3. ####: ########## 133
10.6. ######## 136
10.7. ### 137
10.8. #### 137
11. ###################### 138
11.1. ############# 138
11.2. ############## 138
11.3. ####### 139
11.3.1. ######### ############### 140
11.3.2. ####### 140
11.3.3. ############## 141
11.4. ################ 141
11.4.1. ############ 141

11.4.2. ########## 142
11.4.3. ############# 143
11.5. ######## 143
11.5.1. ###### 144
11.5.2. ####### 145
11.5.3. ######## 146
11.6. ### 146
12. ######## 148
12.1. ########### 148
12.2. ########1918###### 149
12.2.1. ####### 150
12.3. ########1918####### 152
12.4. ################### 156
12.4.1. ####### 158
12.5. ##################### 159
12.6. ### 163
13. ### (##) 164
13.1. ########### 164
13.2. ################# 165
13.3. ###### 165
13.3.1. ############## 165
13.3.2. ################# 167
13.4. ######## 168
13.4.1. ###### ## #### 168
13.4.2. ############## 171
13.4.3. ### ############## 173
13.5. ### 174
14. ### (##) 175
14.1. ########## 175
14.1.1. ######################### 176
14.2. ################### 177
14.2.1. 1#################### 178
14.2.2. #################### 179
14.3. ############ ####### 180
14.3.1. ##############(#) 180
14.3.2. ########## (RoutingTable ###) ### 181
14.3.3. ##### 182
14.4. ####### 183

14.4.1. #### ######## 185
14.4.2. ##### ######## 186
14.5. ### 187
15. ### (##########) 188
15.1. ################### 188
15.1.1. ####### ############# ########## #### 188
15.1.2. ### ######### #### 189
15.1.3. ####### ##### #### 190
15.1.4. ######### ###### #### 191
15.1.5. ### ##### ###### #### 192
15.1.6. ###### #### 192
15.2. ################# 193
15.2.1. ##### ### ####### ##### 194
15.2.2. ####1 ## ####2 # #### ## 195
15.2.3. ########### 196
15.2.4. ####2 # ### ####### ### 197
15.2.5. ####2 ### ### ##### ### 197
15.3. ####### 199
15.4. ### 200
16. ############### 201
16.1. ############ 201
16.2. ########## 202
16.2.1. ###### 202
16.2.2. ####### 205
16.3. ####### 207
16.4. ################# 210
16.4.1. ############## 211
16.4.2. ######## ######## 213
16.4.3. #### ############ 215
16.4.4. ######### 215
16.5. ### 216
17. ############## 218
17.1. ############ 218
17.1.1. ############# 219
17.2. ######### 221
17.3. ####### 222
17.3.1. ############## 223
17.3.2. ################### 223

17.3.3. ############# 225
17.4. ################# 226
17.4.1. ############# ########## (#######_######.##) 227
17.4.2. ########### ####### (####_#######.##) 228
17.4.3. #### ####### (####.##) 230
17.5. ######## ##### 230
17.5.1. ############# 230
17.5.2. ################### 232
17.6. ### 233
17.6.1. #### 233
18. ############ 234
18.1. ############### 234
18.2. ######### 234
18.3. ###### 235
18.3.1. ################# 235
18.3.2. ####### 236
18.3.3. ######### 237
18.4. #### ### ### 238
18.4.1. #### ### ######## 240
18.4.2. ############# 241
18.4.3. ########## 242
18.5. #### ### ## 242
18.6. ############### 243
18.7. ################### 244
18.7.1. ################## ### 245
18.7.2. ##### ### 245
18.8. ### 246
19. #################### 247
19.1. ########## 247
19.1.1. ################# 247
19.2. ######### 248
19.2.1. ########### 248
19.2.2. ######## 249
19.3. ################## 249
19.4. ############# 249
19.4.1. ################### 250
19.4.2. ######################### 251
19.4.3. ############ 251

19.4.4. #################### 252
19.5. ##### 252
19.5.1. ########## 253
19.5.2. ################# 257
19.5.3. ####### 259
19.6. ################ 260
19.6.1. ################################ 260
19.6.2. #################### 262
19.7. ### 263
#. ######### ### ####### 264

#######

2.1. ################################ 7
2.2. ######## ### 8
2.3. ############################ 10
2.4. ##################################### 11
3.1. ############### ######## ######## 14
3.2. ##### ################## ######## ############# 15
3.3. ######## ####### ########### ######## ## ### 16
3.4. ############ ###### ## ################## 17
3.5. ###### ### ################### 17
3.6. #### ### ################ 18
3.7. #### ### # ###### ## ########### ###### ### ## 19
3.8. ####### #######/##### ######################### 20
3.9. ##################################### #### ####### ############# 21
3.10. ########### ### ######### 26
3.11. ### ######## ## ######### 27
3.12. ## ############## ###/### ########## 28
3.13. #### ################## 29
3.14. ################# 30
4.1. ########## 40
4.2. ##### ############## 46
4.3. ######_##### ########## 52
5.1. ############ 57
6.1. #################### 67
7.1. ######################## 85
7.2. ######################## 86
7.3. ###### #####_#####.#### ########### 88
8.1. ##########1#####2################## 100
8.2. ################1#### 101
8.3. #####################(#########)### 102
8.4. ###### ################################## 103
8.5. ## ################## 104
8.6. ###2###1#### 105
9.1. ########1.3######################## 115
9.2. #### ## 0 ##### ######### ######################## 116
9.3. ############ ############### 118
10.1. ### 3 ############### 126

10.2. ######## ####### 127
11.1. ########################## 139
11.2. ###################### 140
11.3. ### 142
11.4. ################################## 142
11.5. ################################### 143
11.6. ### 146
12.1. ########### 148
12.2. ########1918############################## 150
12.3. ########1918 ################## 151
12.4. #######################→######################## 157
13.1. ###################################### 166
13.2. #### ### ########### ### ######## 166
13.3. ###### ### ########### 167
13.4. ################## 168
14.1. ########################## 176
14.2. ## ## ########## 177
14.3. ######################## 178
14.4. ################## 179
14.5. 0.0.0.0/0 ############## 180
14.6. ################ 184
15.1. #################### 188
15.2. ############ ## = 0 # ####### ############ ######## ########## ######### . 189
15.3. ### ######### ############# 190
15.4. ### ######### ############# 191
15.5. ######### ###### ############# 192
15.6. ### ##### ###### ############# 192
15.7. ###### ############# ###1 ###### 193
15.8. ############################ 193
15.9. ####1 ######## 1 ## ### ####### ####### 194
15.10. ####1 # ####2 # #### #### ####### ######## ####2 # ### ############## 196
15.11. ####2 # ### ######## #### #### ####### # ####2 ######### 198
16.1. 2015 # ####### ##### # ####### #########: ####://###.#######.##/2015/ #######/######/########02.### ######### # ####### ##### 2015 ####### ### #### ###### ### #### ### #####, ###. ### ###### ########. 201
16.2. #### ############ 203
16.3. #### ##### ######## ################ 204
16.4. #### 0#2 ######## ###### ## ##### 205

16.5. ############## 206
16.6. #### 0#1 ########## 207
16.7. ########.######### 208
16.8. #### 0#1 #### 1 ############# 209
16.9. ######################### 210
16.10. ########## 211
17.1. ################ ######## ######## 1 ################ 219
17.2. ########################### 220
17.3. ######################## ######## ##### 221
17.4. ################## 222
17.5. ### 4 ###### 6 ########### 223
17.6. ######### 225
17.7. ################ 227
17.8. ########### #### 229
17.9. ################################ 231
17.10. ################################ 232
17.11. ################################### 232
18.1. ############# 1 ################################### 234
18.2. ######################## 235
18.3. ######## 236
18.4. ############# #### ### ## 239
18.5. ############### 243
18.6. #################### 244
19.1. #################### 248
19.2. ################### 249
19.3. #################### 250
19.4. ######################### 251
19.5. ######################## 252
19.6. 1#################### 253
19.7. #################### 257
19.8. ########### 258
19.9. ############################ 259
19.10. ######################## 259
19.11. ############################ 261
19.12. ########################### 262

######

2.1. # 1#1: ############### 7
2.2. # 1#2: ########################### 8
2.3. # 1#3: ################# 9
2.4. # 1#4: ######################### 10
3.1. ################## 22
3.2. ###########################1 30
3.3. ###########################2 31
3.4. ######################### 1 (#####1) 32
3.5. ######################### 2 (#####2) 33
3.6. ############# ############ 1 (#####1) 33
3.7. ############# ############ 2 (#####2) 34
3.8. ################# 1 (#####1) 35
3.9. ################# 2 (#####2) 35
6.1. ######## ######## (##) 71
6.2. ########### #####.### ###### 73
6.3. ########## 75
6.4. ####_####_###_############## 76
9.1. ######## 1.3 ########### (##############) 116
9.2. ######## 1.3 ########### (#######) 117
9.3. ######## 1.3 ############### 118
18.1. # 17#1: #### ### ## 242

1.

#####[1]##1.3.############################2.0#####

- #######: #####://########.######.###/##########/
- ######: (###)
- ################: #####://######.###/########/##########
- ##############: #######[2]

1.1.

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

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

[2] #####://#######.###/#######/#####%#6%9#%##

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

- #########[4]
- ####.######[5]
- 7############[6]
- ########[7]

1.2.

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

git clone git@github.com:yasuhito/trema-book.git
cd trema-book
bundle install
bundle exec rake

1.3.

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

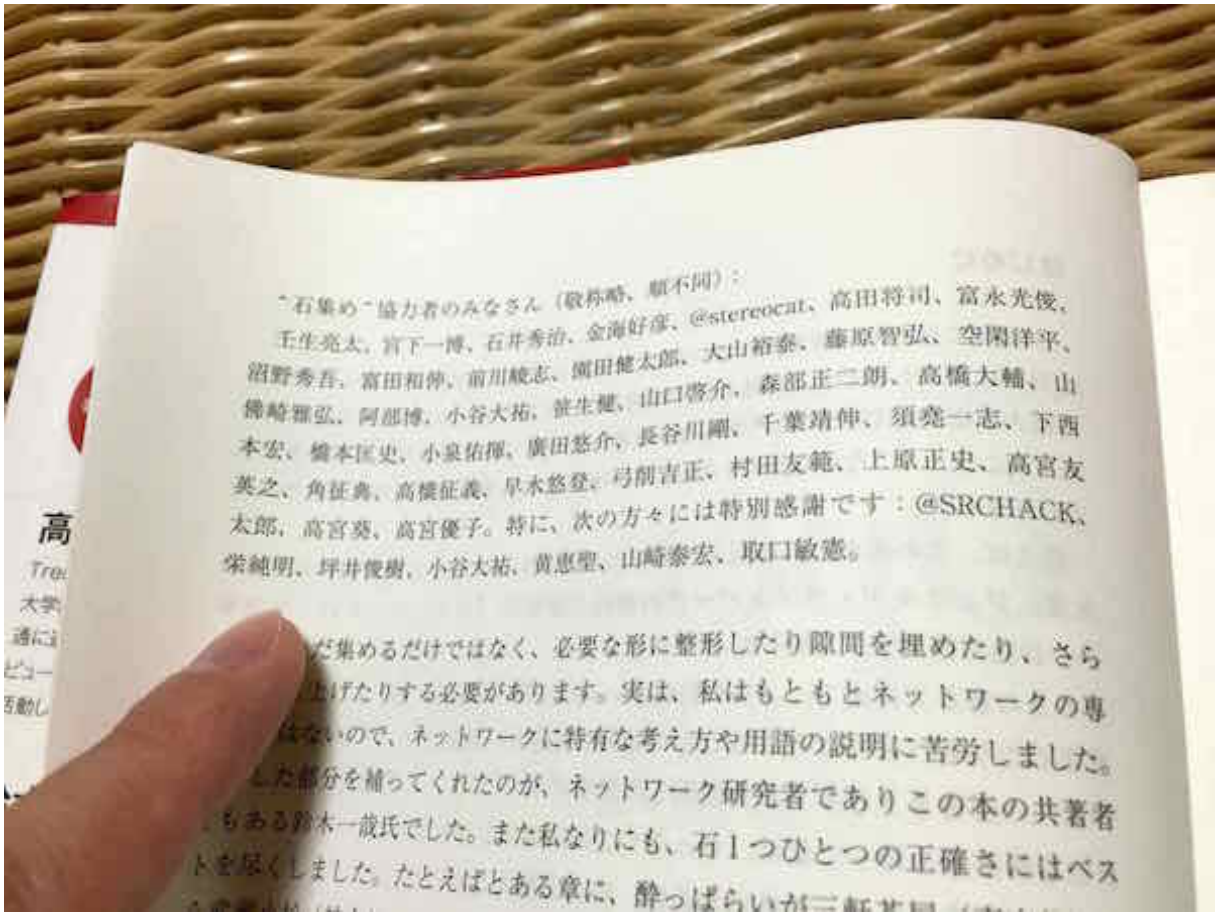
######## ###########[8]#####

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

########[9]################################ ####################[10]######
####

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

[3] #####://#####.##/####/2016/978#4#7741#7983#4
[4] ####://###.######.##.##/#/####/4774179833/
[5] ####://###.#########.###/##/
##/100000009002526970/
[6] ####://7###.####7.##/######_####/978#4#7741#7983#4
[7] ####://#####.##/########/#######_27703803.####
[8] #####://######.##/########/##########
[9] ####://########.###/
[10] ####://###########.###/####/###########/



"石集め"協力者のみなさん（敬称略、順不同）：
壬生亮太、宮下一博、石井秀治、金海好彦、@stereocat、高田将司、富永光俊、
沼野秀吾、富田和伸、前川純志、園田健太郎、大山裕泰、藤原智弘、空閑洋平、
樋崎雅弘、阿部博、小谷大祐、笹生健、山口啓介、森部正二朗、高橋大輔、山
本宏、橋本匡史、小泉拓輝、廣田悠介、長谷川剛、千葉清伸、須堯一志、下西
英之、角征典、高橋征義、早水悠登、弓削吉正、村田友範、上原正史、高宮友
太郎、高宮葵、高宮優子。特に、次の方々には特別感謝です：@SRCHACK、
栄純明、坪井俊樹、小谷大祐、黄惠聖、山崎泰宏、取口敏憲。

だ集めるだけではなく、必要な形に整形したり隙間を埋めたり、さら
上げたりする必要があります。実は、私はもともとネットワークの専
はないので、ネットワークに特有な考え方や用語の説明に苦労しました。
した部分を補ってくれたのが、ネットワーク研究者でありこの本の共著者
もある鈴木一哉氏でした。また私なりにも、石1つひとつの正確さにはベス
トを尽くしました。たとえばとある章に、酔っぱらいが三軒茶屋

1.4.

3.0:

- ####://###.###.###/########/####3.0.####

2. ########

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

2.1.

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

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

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

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

########

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

#########

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

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

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

###

###

> ##################################16 ##################17 # #########################

2.2.

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

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

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

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

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

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

- ##
- ##
- ##

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

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

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

2.3. ########

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

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

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

2.3.1. ##### 1:

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

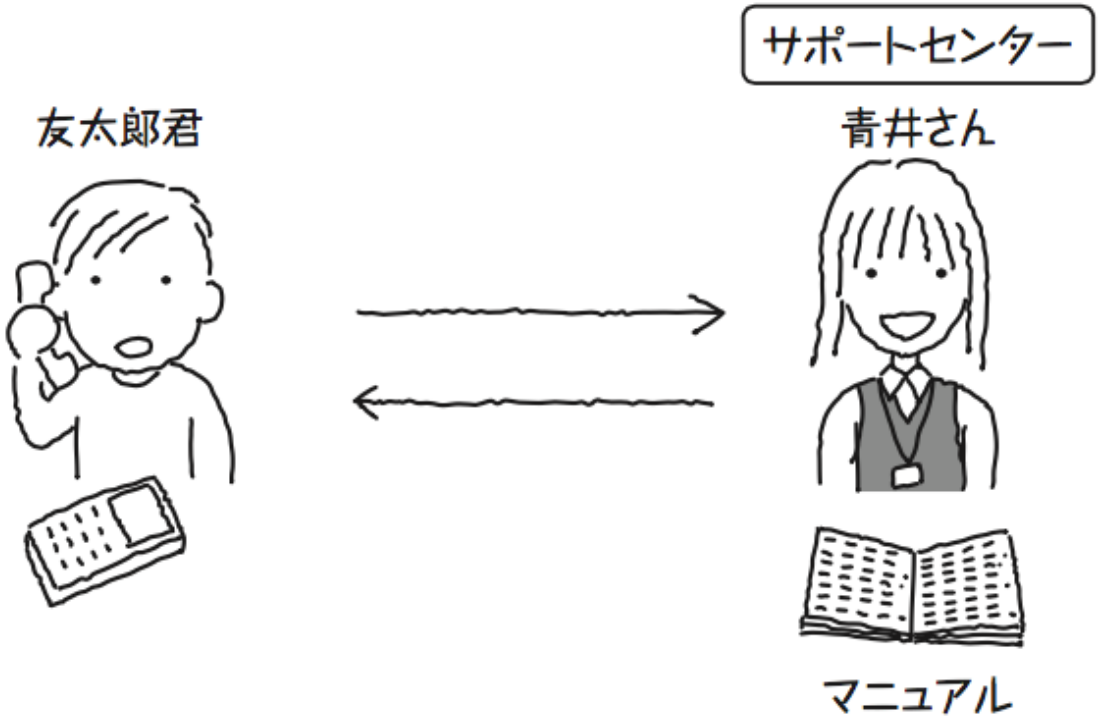
###
#################

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

###

2 ### (#1#1)#

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



2.1.

##########

###

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

2.1. # 1#1:

#######	####	#######
#######	################	8 #
#########	################	6 #
######	################	4 #
######	#####	2 #

###

##

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

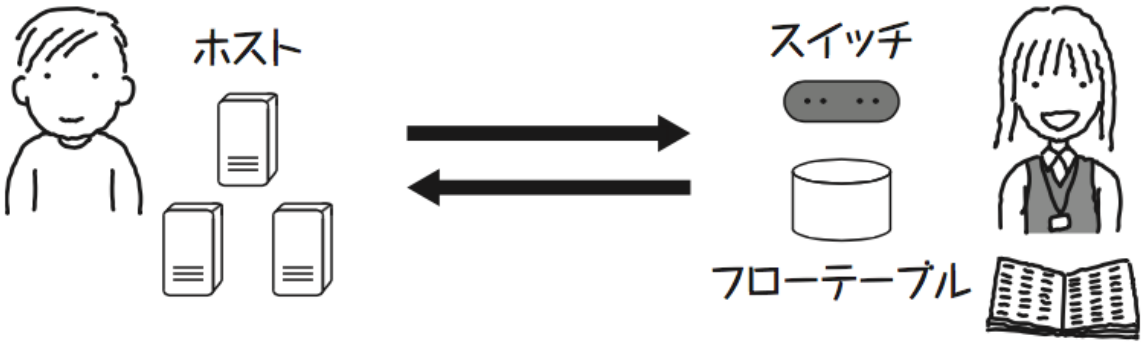
2.2. # 1#2:

#######	####	#######
#######	###############	9 #
########	###############	6 #
######	###############	4 #
######	#####	2 #

###
###

2.3.2. ########

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



2.2. ########

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

2.3.3.

###
###

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

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

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

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

2.3.4. ##### 2:

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

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

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

8

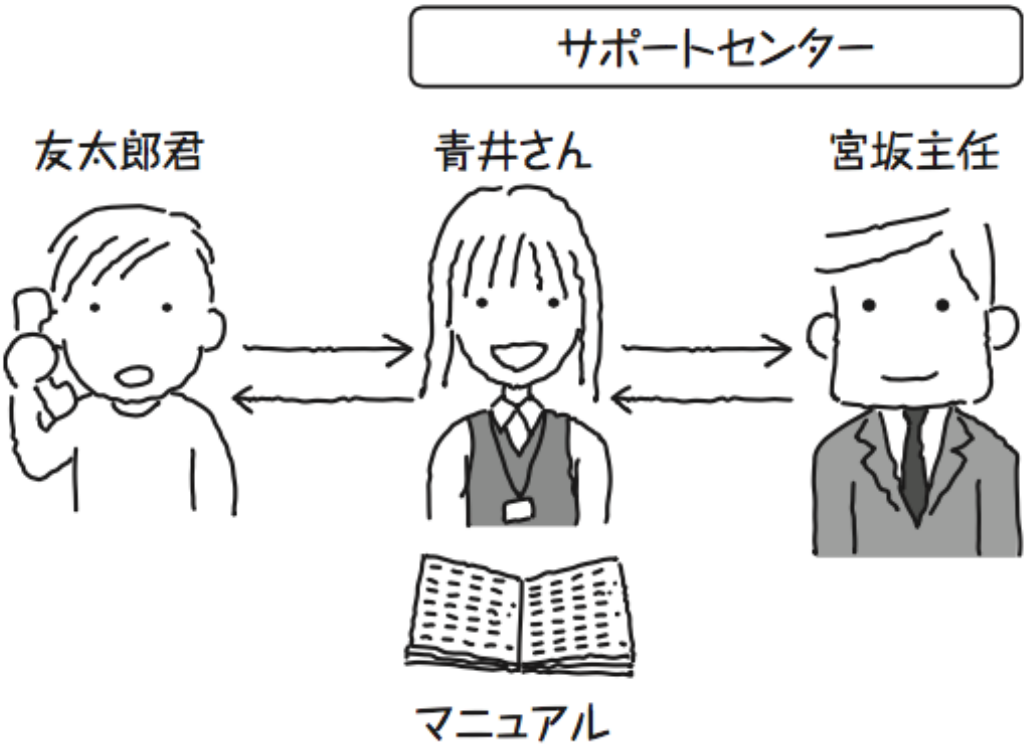
9
############# 80 ##############

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

2.3.4. ##### 2:

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

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



2.3.

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

##

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

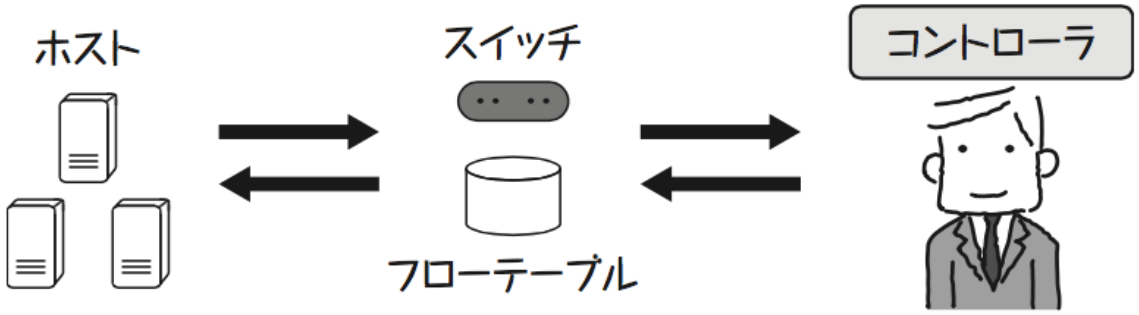
############################

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

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

#######

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



2.4.

##
##

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

2.4. ########

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

2.4.1.

##
###

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

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

2.4.2.

##

######## ##

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

2.4.3.

###

###

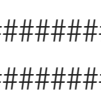
########################

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

2.4.4.

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

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



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

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

2.5.

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

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

2.6.

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

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

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

3. ########

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

3.1.

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

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

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

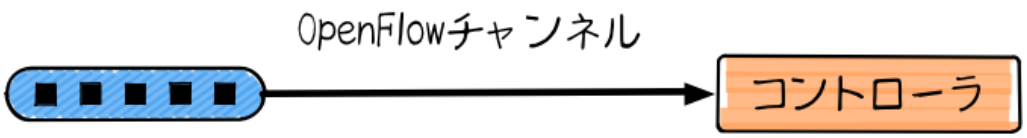
##

3.2.

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

3.2.1.

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

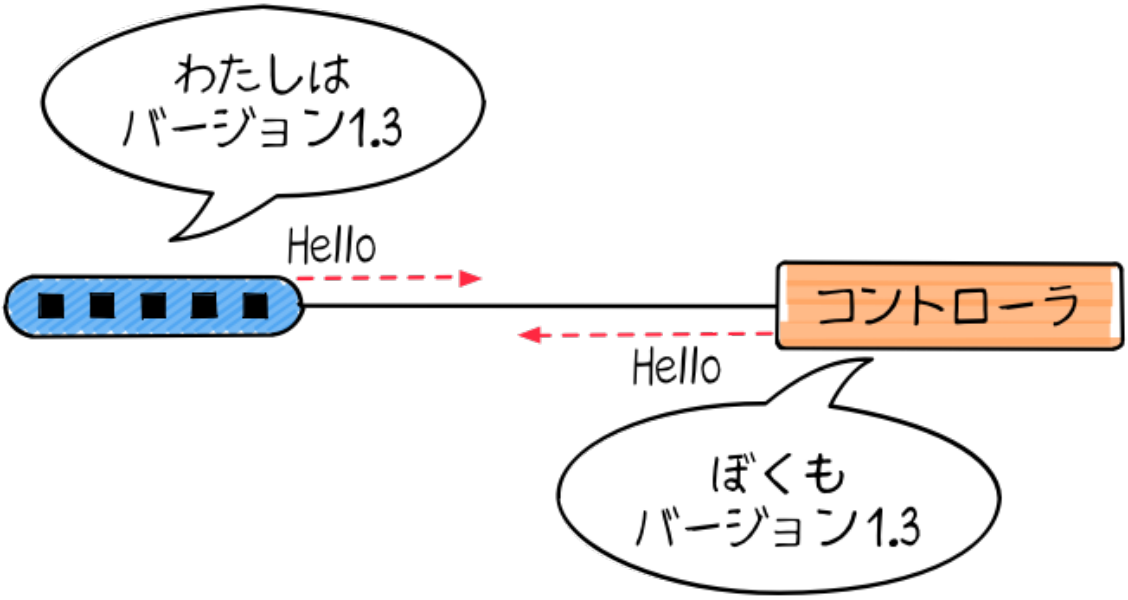


3.1. ############### ########

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

3.2.2.

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

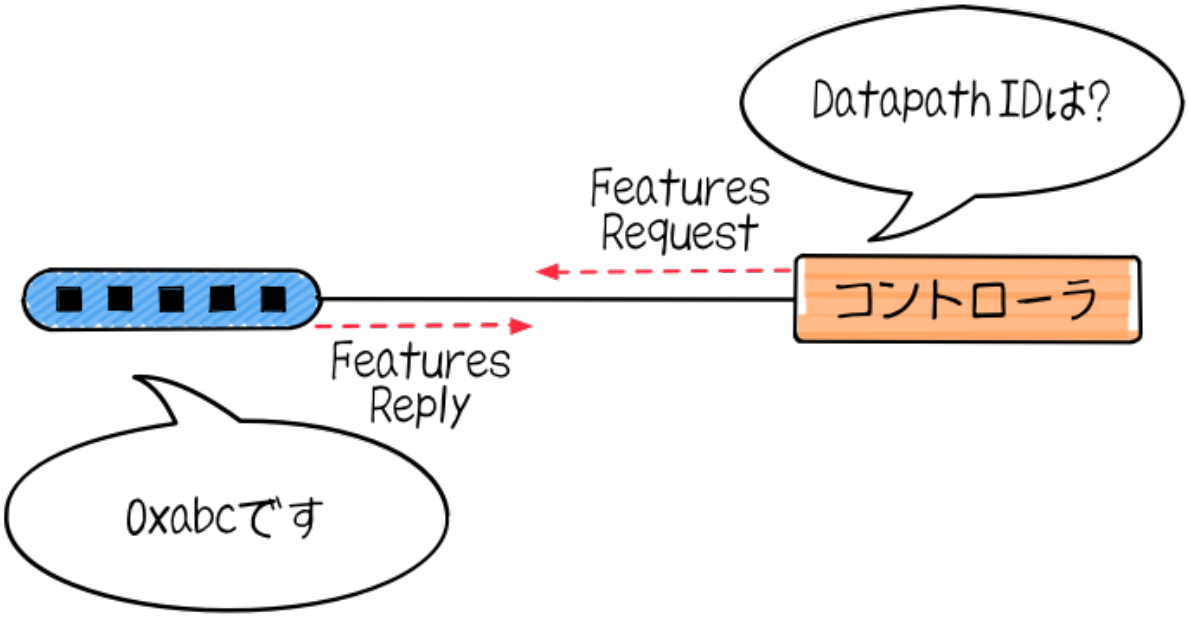


3.2. ##### ################## ########

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

3.2.3. ##### ######## ##

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


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

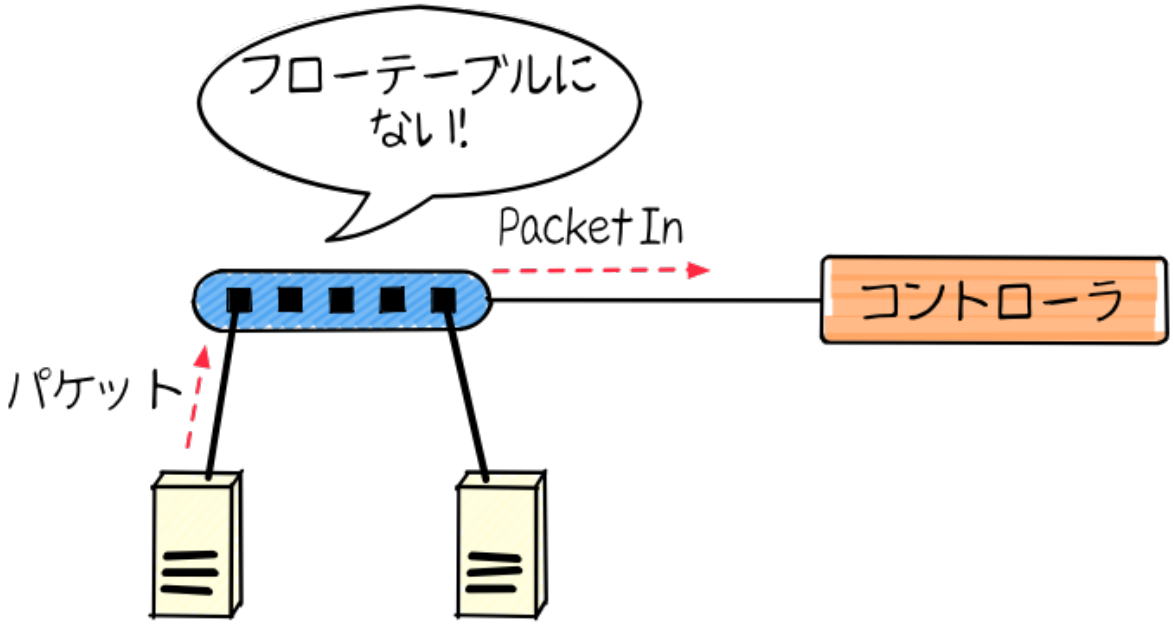
3.3. ######## ####### ########### ######## ##

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

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

3.2.4.

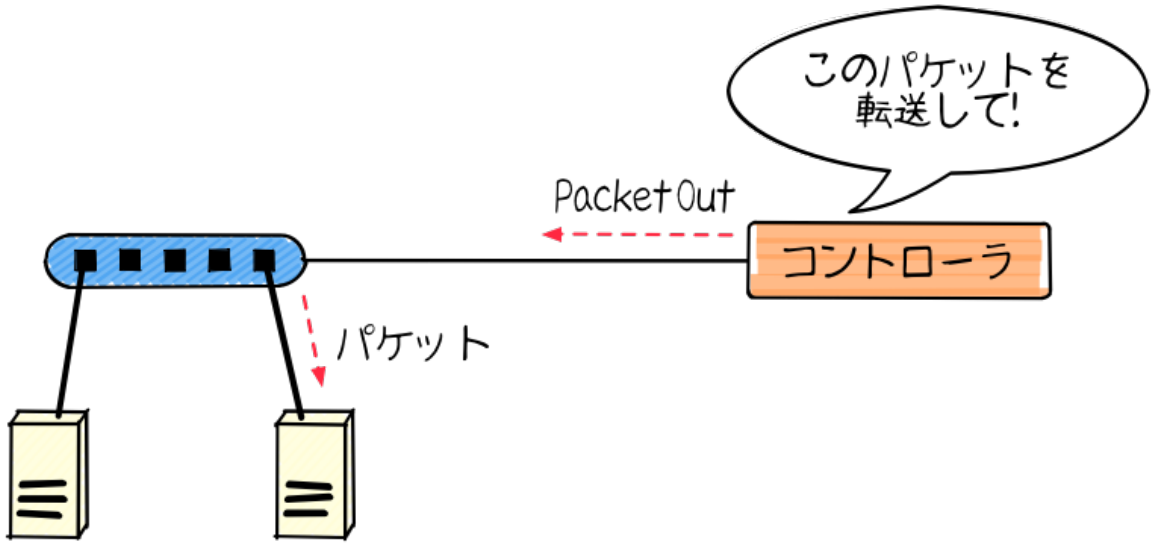
#################### ###### ## ## ############ ## ############################ (# 2#4)#


フローテーブルに
ない!
Packet In
コントローラ
パケット

3.4. ############ ###### ##

3.2.5.

(# 2#5)#

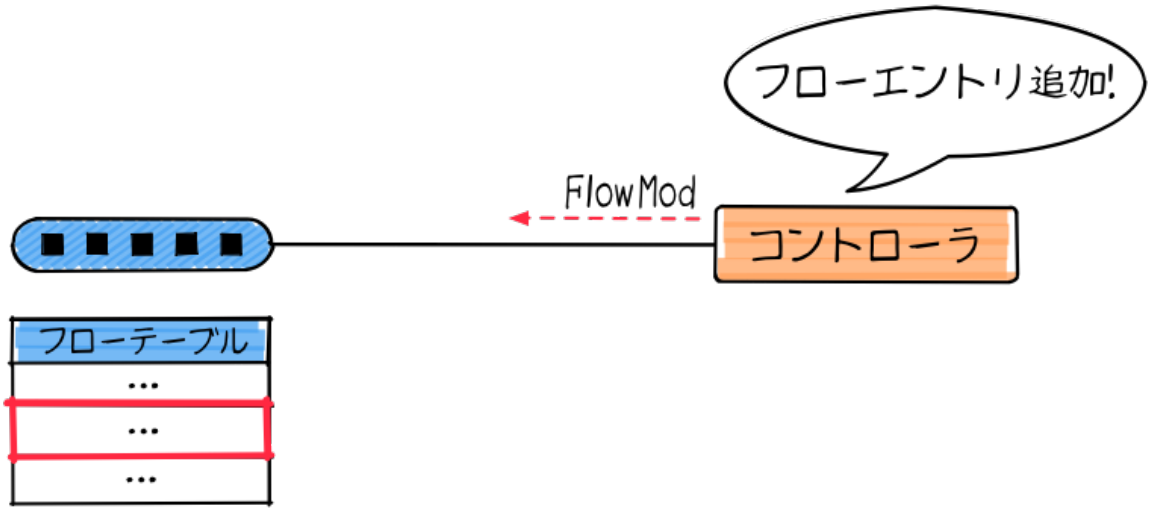

このパケットを
転送して!
Packet Out
コントローラ
パケット

3.5. ###### ###

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

3.2.6.

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

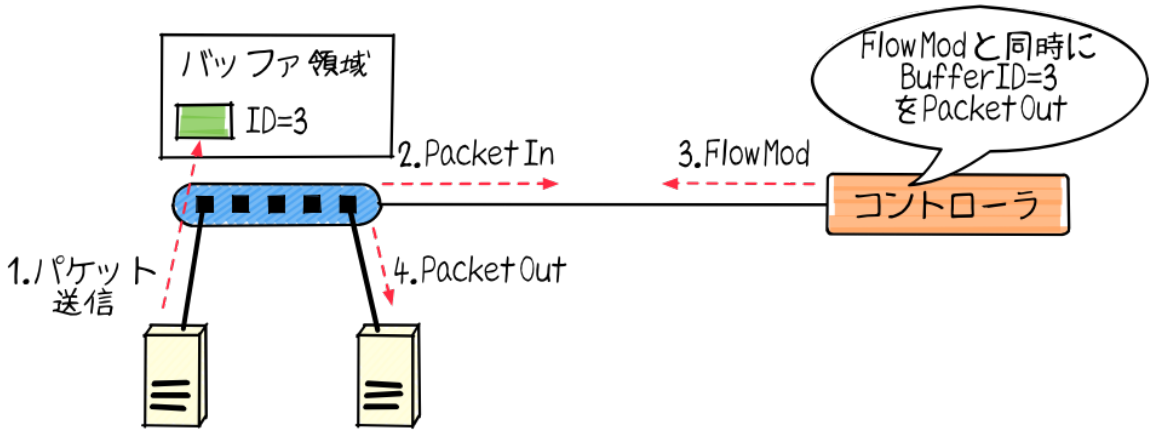


3.6. #### ###

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

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

> ## ######## ######1## #### ### ######### ###### ### ########### ##############################
>
> ## #### ### & ###### ### ## 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

3.7. #### ### # ###### ## ########### ###### ###

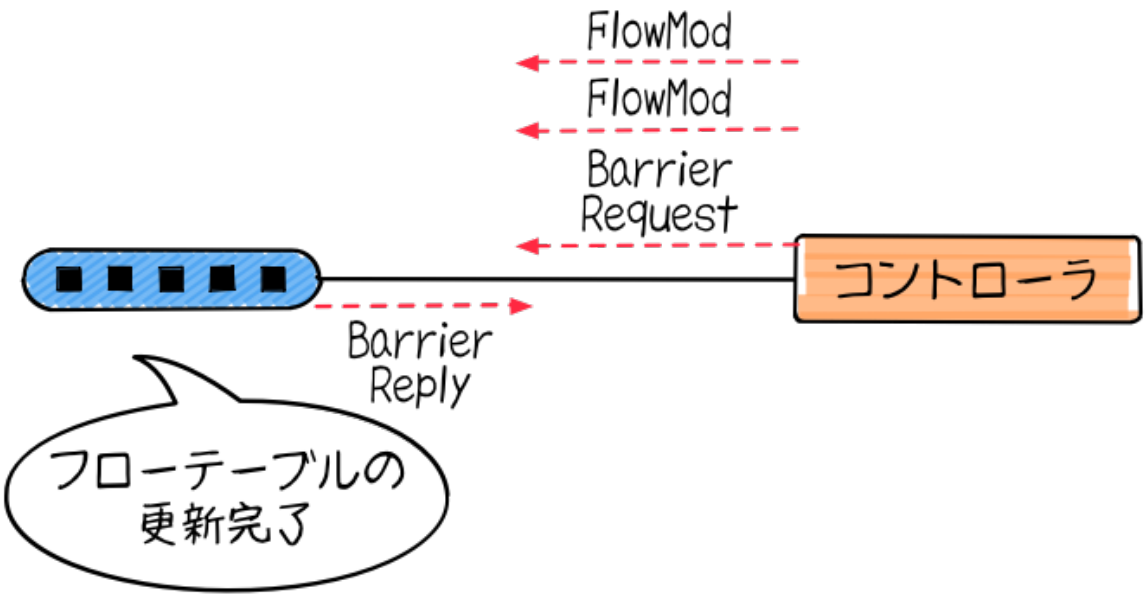
################### 3 #########

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

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

3.2.7.

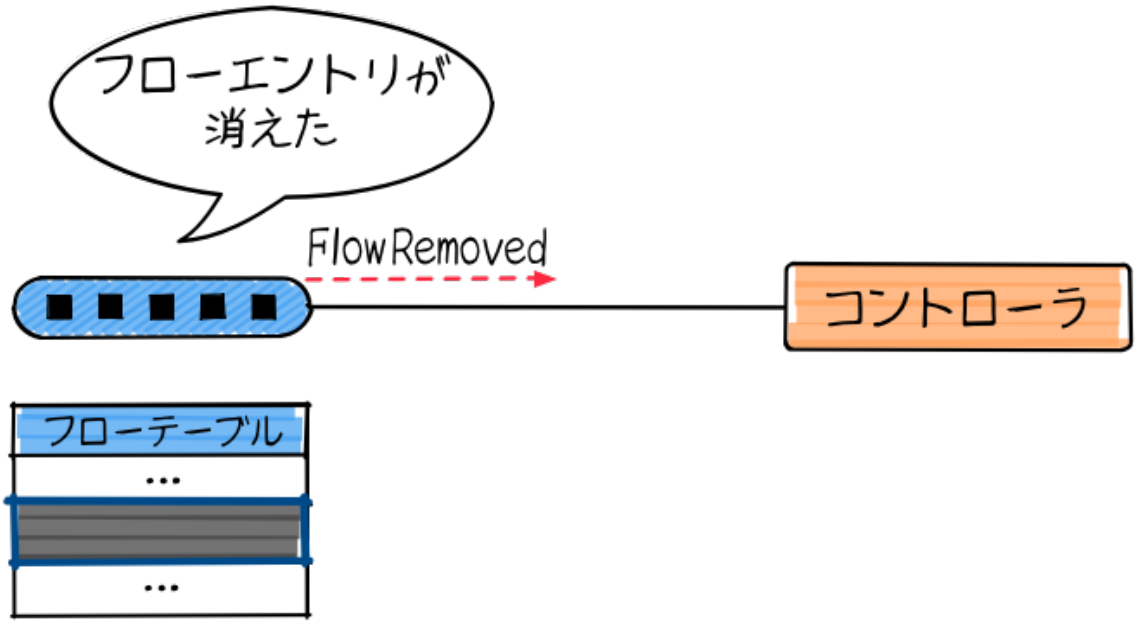
(# 2#8)######## ####### ####### ################## #### ### ###################### ####### ##### #####


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

3.8. ####### #######/#####

3.2.8.

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



3.9. ## #### ####### ##

3.3.

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

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

3.3.1.

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

3.3.2. #### (####)

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

- #######

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

3.3.3. ###### (##)

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

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

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

3.3.4.

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

3.3.5.

##

##	##
## ### ####	############
##### ###	### ### ####
##### ###	## ### ####
##### ####	#########
#### ##	#### ##
#### ########	#### ### ## (###)
## ####	######## #######
## ###	## ### ###
## ###	### ## ####
## ###	## ## ####
## #####	## ########
### ### ####	### #########
### ### ####	### ########
### ### ####	### #########
### ### ####	### ########
#####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 ###### ##############
>
> ############ ################################

3.3.6.

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

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

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

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

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

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

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

[Set-Field, Output]

##

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

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

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

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

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

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

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

3.3.7. ######

##
#######

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

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

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

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

3.3.8. #########

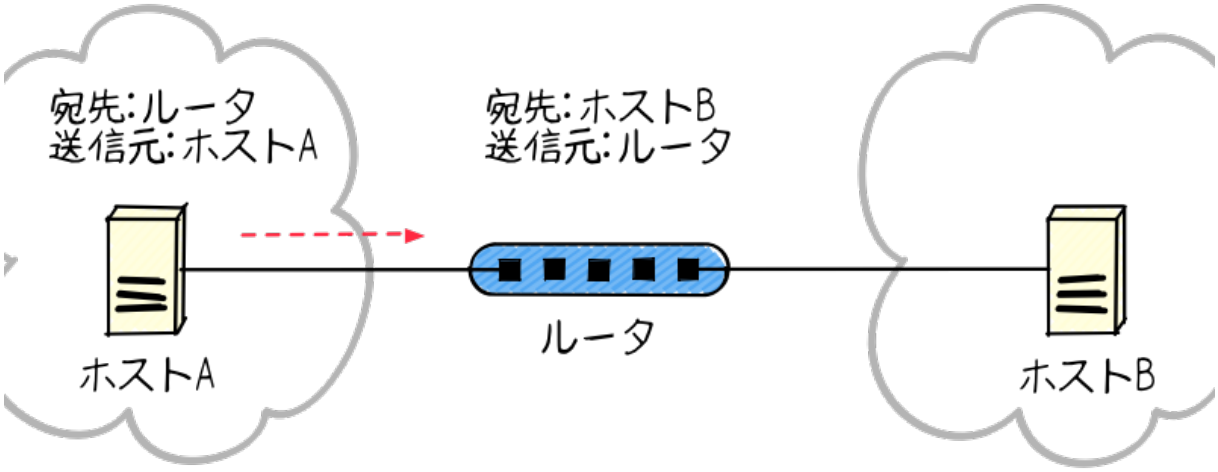
######### ##
####### (#2#1)####################

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

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

#########

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

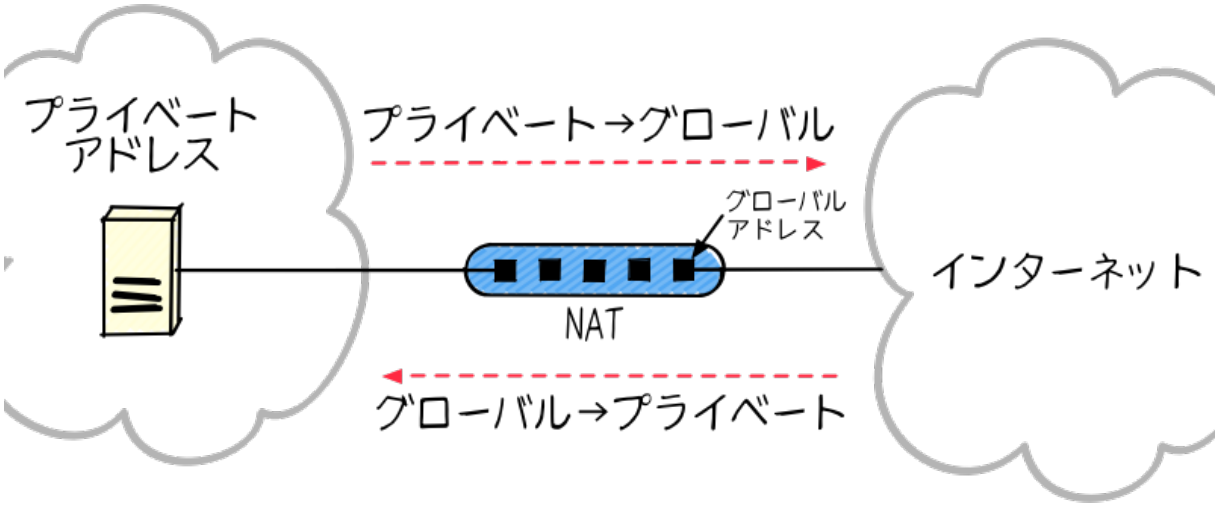


3.10. ########### ###

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

3.11. ### ######## ##

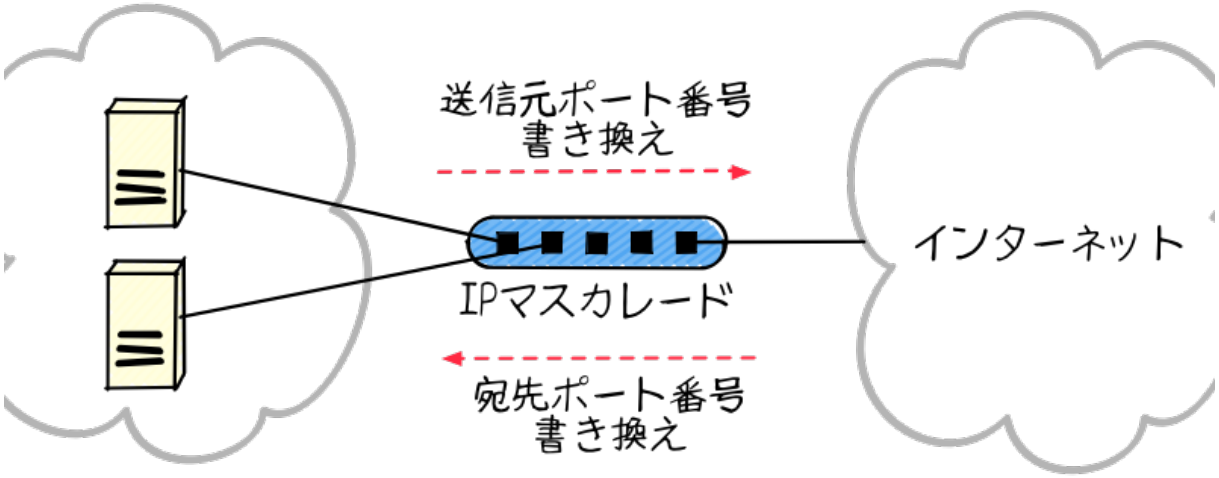
#########################/######################## ## ######################### ## ## ###### ######## ## ## ##

###########

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

/###

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

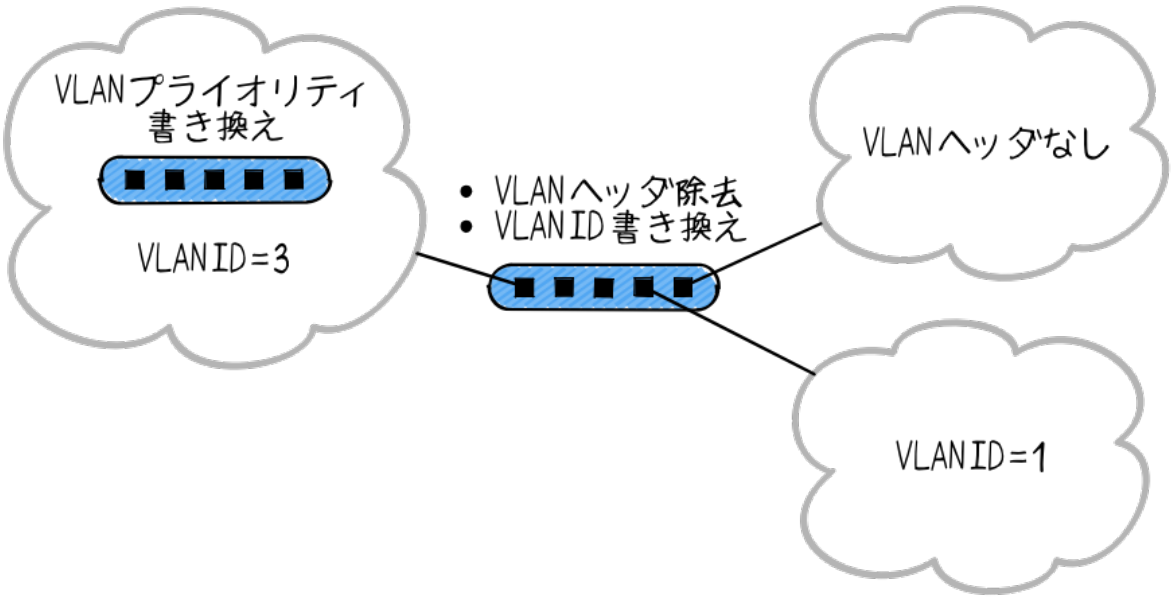


3.12. ## ############## ###/###

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

3.13. ####

#####

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

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

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

3.3.9. ##########

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

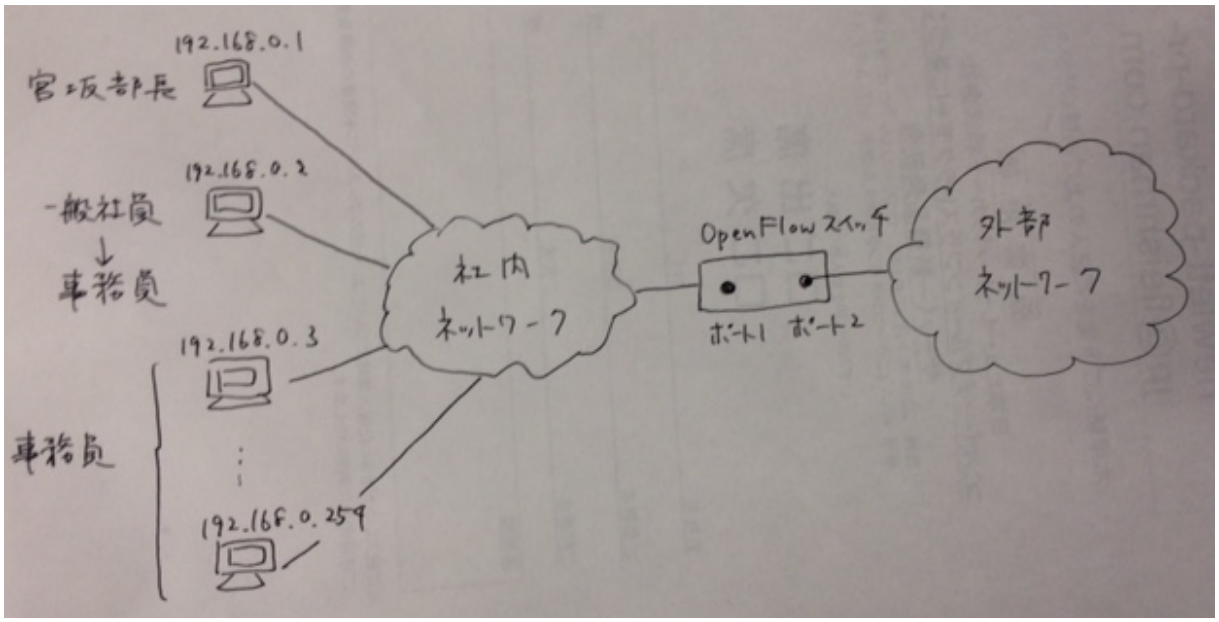
- #### #### ### ######## (### #### ###)
- ## #### ### ######## (### ## ###)
- #### #### ### ####### (######### #### ###)
- ## #### ### ####### (######### ## ###)
- ###### ### ######### ### ########## (#### ### ########)
- ###### ### ######### ### ########## (#### ### #######)

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

3.4.

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

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



3.14.

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

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

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

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

3.5. ######################### 2 (#####2)

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

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

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

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

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

3.6. ############# ############ 1 (#####1)

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

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

3.7. ############# ############ 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 ##

3.8. ################## 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

3.9. ################## 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 ######

###

3.5.

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

4. #####, #####!

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

4.1.

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

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

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

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

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

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

(6#)

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

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

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

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

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

####### (9#)

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

(10#)

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

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

###########

(12#,13#,14#)

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

(15#)

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

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

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

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

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

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

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

##

4.2.

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

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

###########

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

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

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

########

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

###########

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

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

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

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

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

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

###

#########?

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

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

4.1.

#######################[3]#####################.....##########
##################! ##
##########

4.3.

###

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

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

####

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

####

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

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

####### [2]

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

[3]

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

4.3.1.

##

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

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

```
$ 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++
```

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

4.3.2. #######

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

```
$ gem install bundler
```

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

4.3.3. ####

##

[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
```

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

4.4. #####, #####!

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

4.4.1. #####

#####!##########
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 ###:[####+#] ##########

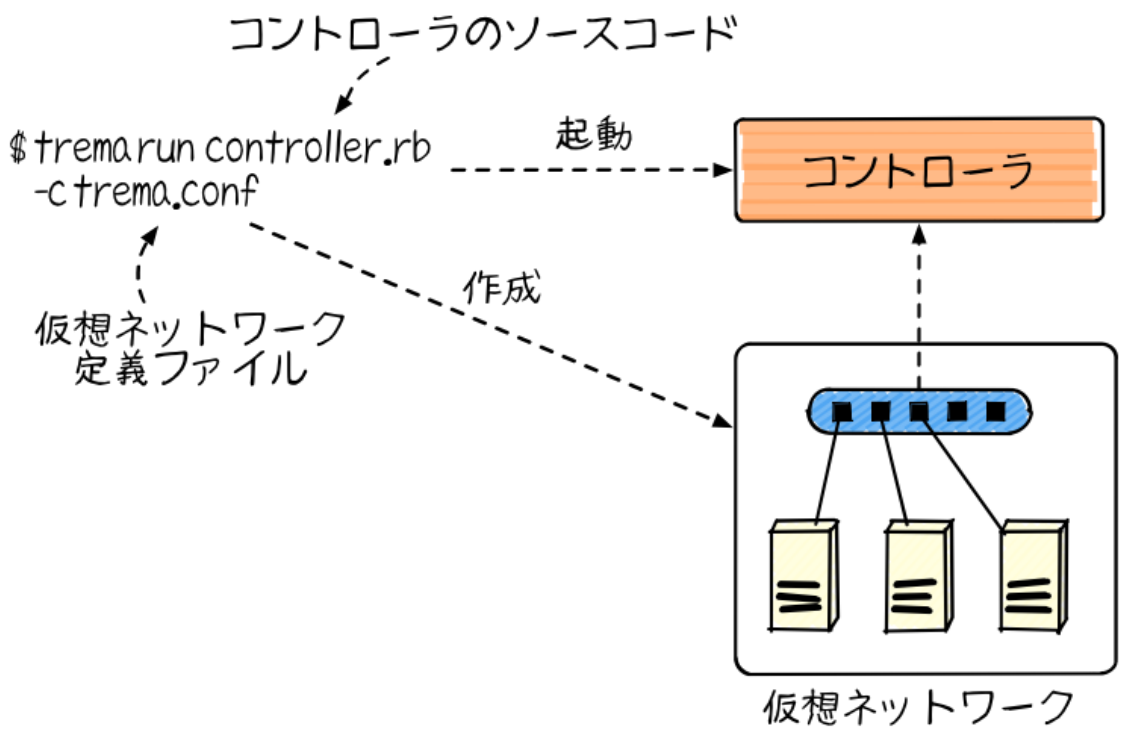
`Trema started. Hello, 0xabc!`

############ `trema` ############################## `trema` ######################################

4.5. #####

`trema` ##### ##### ##

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



4.2. #####

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

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

4.6.

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

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

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

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

4.6.1.

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

4.6.2.

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

4.6.3.

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

```
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`

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

4.6.4.

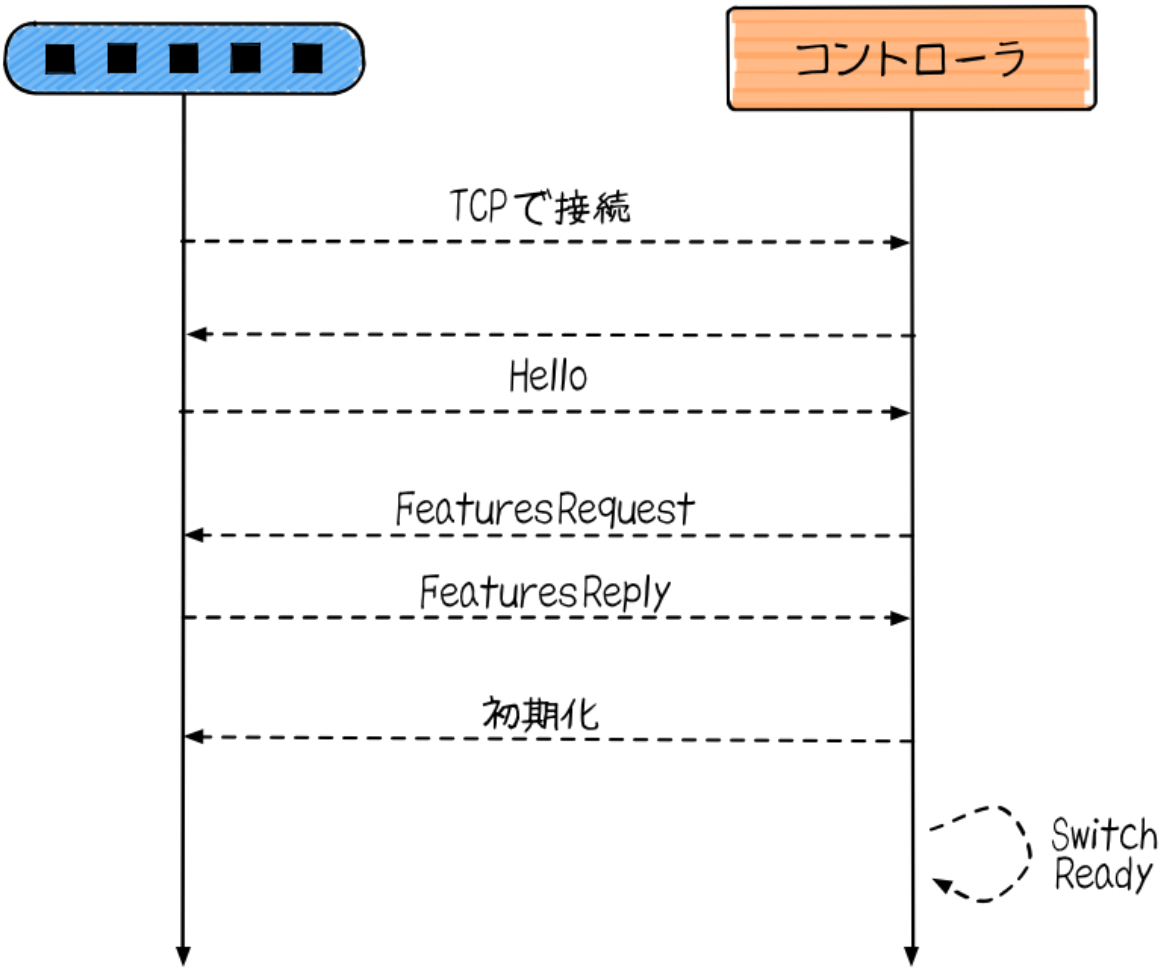
############ `switch_ready` ########### `switch_ready` ###################################### ### 16###(0########)##########

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

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

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

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



4.3. ######_#####

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

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

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

################## 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!
```

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

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

4.7.

##, #####!##

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

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

4.8.

##

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

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

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

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

5.

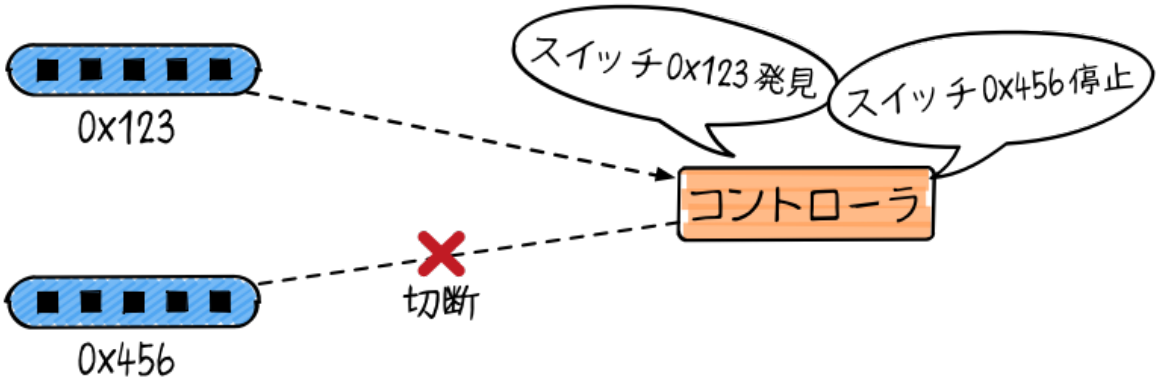
##

5.1.

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

##
##

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



5.1.

5.2.

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

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

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

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

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

5.3.

#########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##…#################

5.3.1. #########/#######

`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 ### ###

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

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

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

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

##

5.4.

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

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

```
# 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, desc)
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} manufacturer = #{desc.manufacturer}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} hardware info = #{desc.hardware}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} software info = #{desc.software}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} serial number = #{desc.serial_number}"
    logger.info "Switch #{dpid.to_hex} description = #{desc.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 ##############################################################
#################################################
```

5.4.1.

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
```

5.4.2.

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

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

5.4.3.

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

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

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

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

5.4.4.

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

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

5.4.5.

################################## `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, desc)
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} manufacturer = #{desc.manufacturer}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} hardware info = #{desc.hardware}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} software info = #{desc.software}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} serial number = #{desc.serial_number}"
  logger.info "Switch #{dpid.to_hex} description = #{desc.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`

5.5.

#######

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

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

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

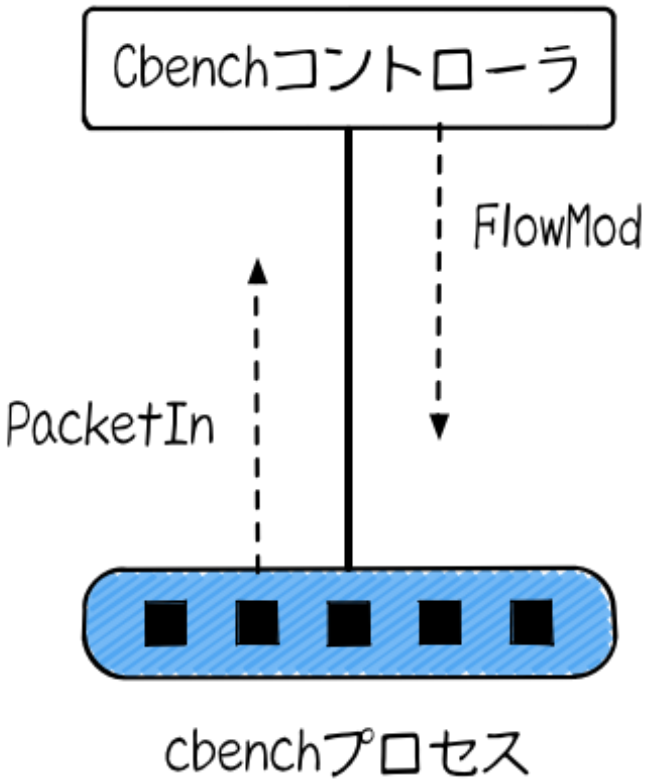
6.

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

6.1.

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

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



6.2.

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

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

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

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

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

6.3.

##

```
$ ./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 ###### #### ### # ########################## ############ ################

6.4.

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

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

```
# 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
```

##

6.4.1.

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

- `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"
```

###

6.4.2.

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

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

####### `start` ### `_args` ##############
###

6.4.3. ######_######

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

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

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

###

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

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

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

6.1. ######## ######## (##)

####	##
:###_####	#####################
:##_####	########################
:########?	###### ############################## ####
:######_##	##################### ## ###
:#####_######	############
:######_###_#######	##################
:###########_###_#######	##################
:###4?	########4##### `true` ###
:###4_########	##############
:###4_######_#######	##################
:###4_###########_#######	##################
:###4_###	##############
:###?	############# `true` ###
:###_######_####	####################
:###_###########_####	##################
:###?	############# `true` ###
:###_######_####	####################
:###_###########_####	####################

####	##
:####?	################### true ###
:####_###	###########
:####_########	###########
:#####_####	#########

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

6.4.4. #### ###

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

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

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

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

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

6.3.

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

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

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

############## buffer_id: ###### send_flow_mod_add ########################### ## # ###### ############ ## ##############

```
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  match: ...,
```

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

❶ # # # # # # # # # # # # # #

6.5.

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

6.5.1.

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

6.6.

#################### ###### ########## ###### ## ################## ####### ##### ### ################################### ###### ## ####### `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 ############### ########################
>
> ####### ###### ## ## ## ###### ## ################## ###### ## ########### ###### ## ## ############################
>
> ###### ## ############# ##################

6.7.

##

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

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

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

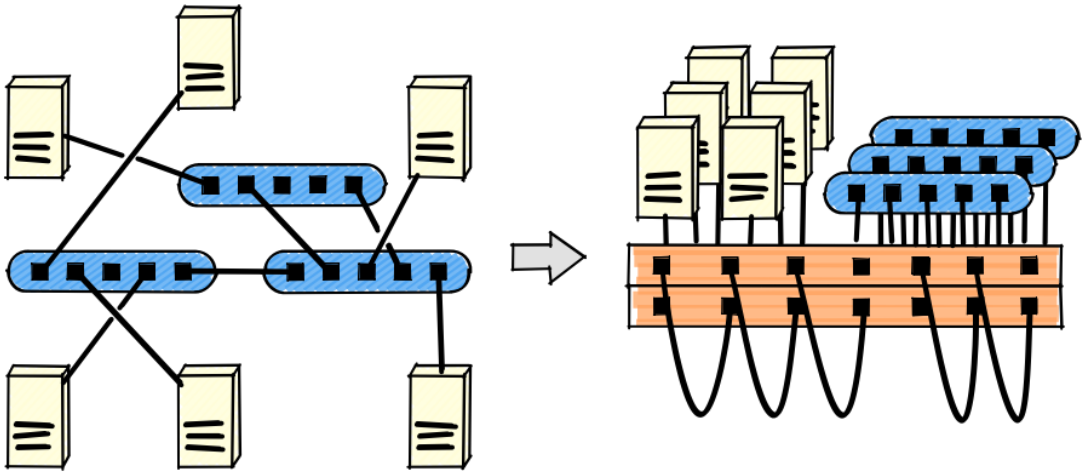
7.

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

7.1.

###
###
##

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



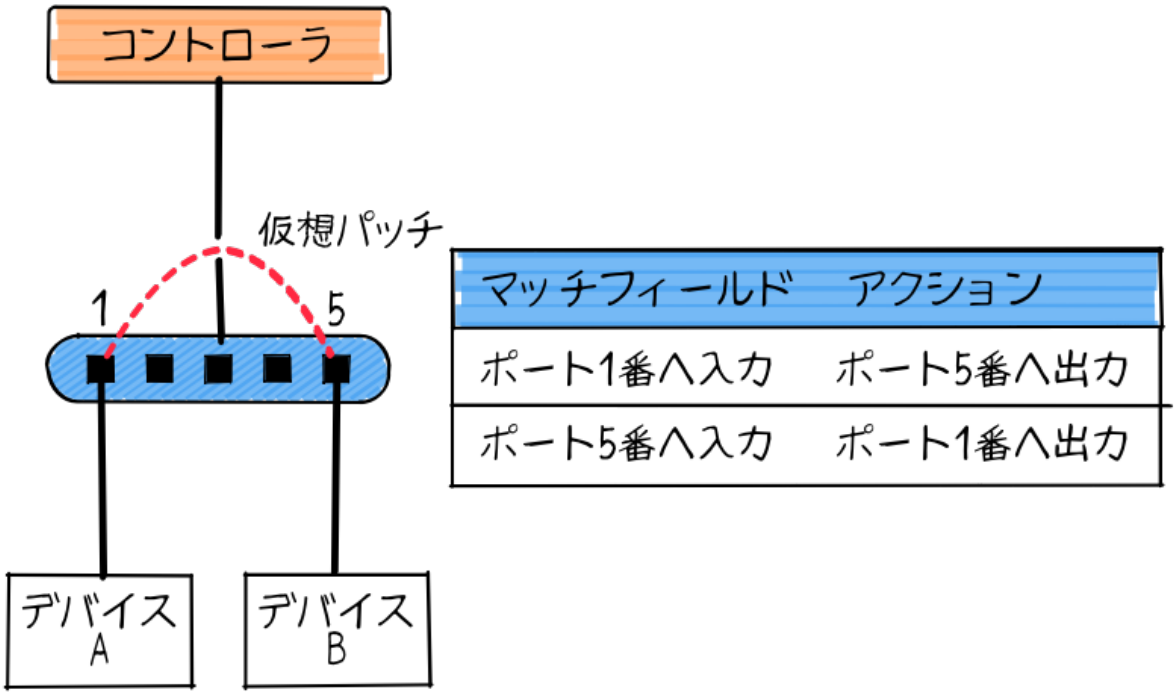
7.1.

##
##
###

7.2.

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

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



7.2.

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

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

###

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

7.3.

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

```
$ 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 : #############

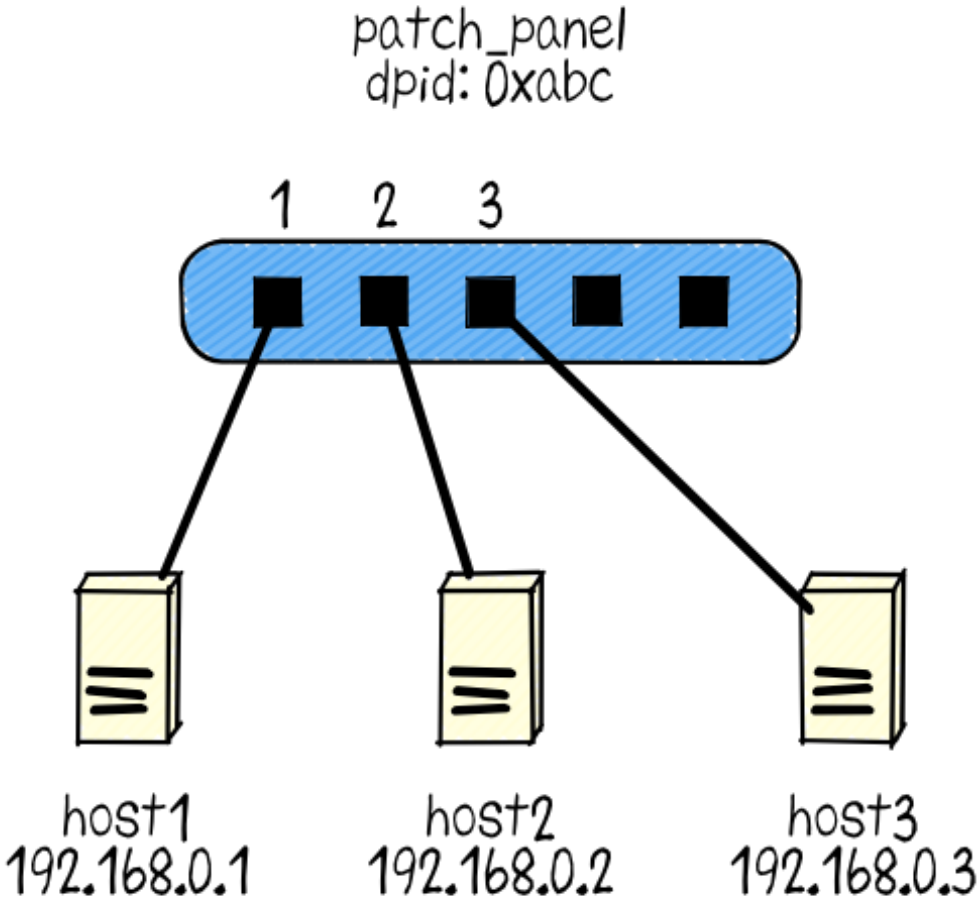
7.3.1.

############## 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 ##… ########



7.3. ###### #####_#####.####

`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
```

###

7.4.

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

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

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

###

7.4.1.

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

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

```
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)
```

7.4.2.

################## ({}) ## : ##### ###########

```
animals = { armadillo: '#####', boar: '####' }
```

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

```
animals[:boar] #=> "####"
```

############## (##### :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
```

7.4.3. ######_#########

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 ######## 1 ############ (##)##### port_a # port_b #2#####
################ 1 #####

❷ ########## delete_flow_entries ##############

❸ ########## add_flow_entries ################################ ############
######2#######

7.4.4.

###

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

```
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 # #####_######_###### ###)##################
#######

7.4.5. ###_####_############

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 #####

7.4.6. ######_####_###########

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

7.4.7. ######_#####, ######_#########

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
```

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

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

7.5.

##

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

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

############### 3 ##### ######## ######## #### ###, ###### ##, ###### ### #######
##################

8.

###
##

8.1.

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

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

###
###
##

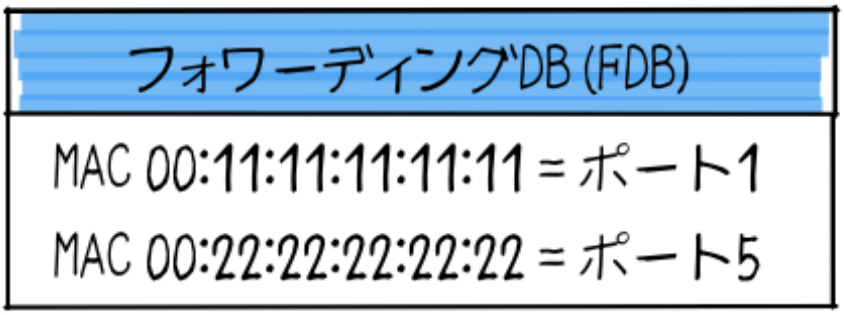
###

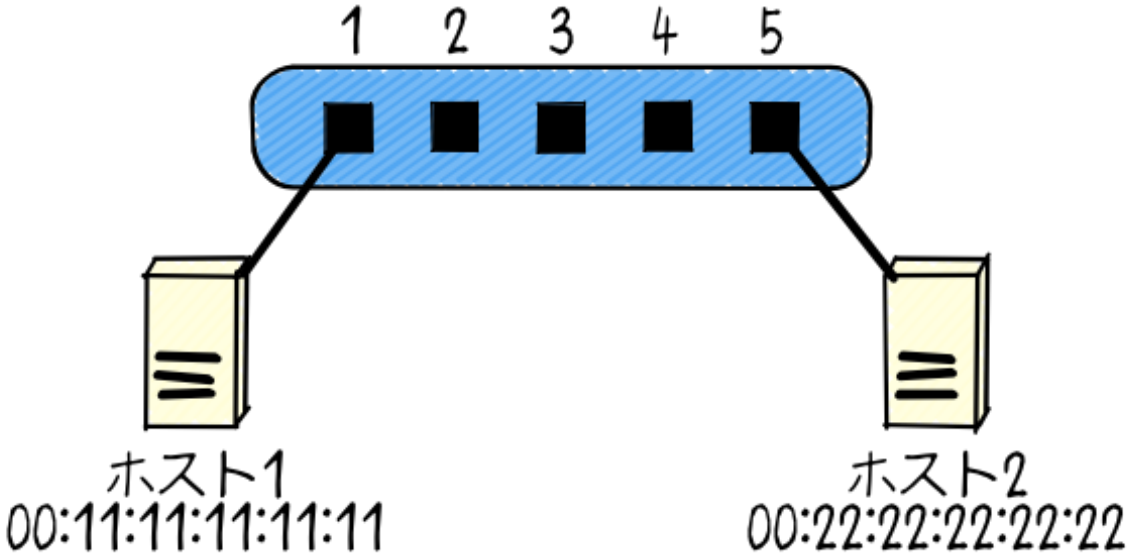
- ### (12#,13#,14#)
- ########## (16#)
- ########## (17#)

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

8.2.

################################(# 7#1)#





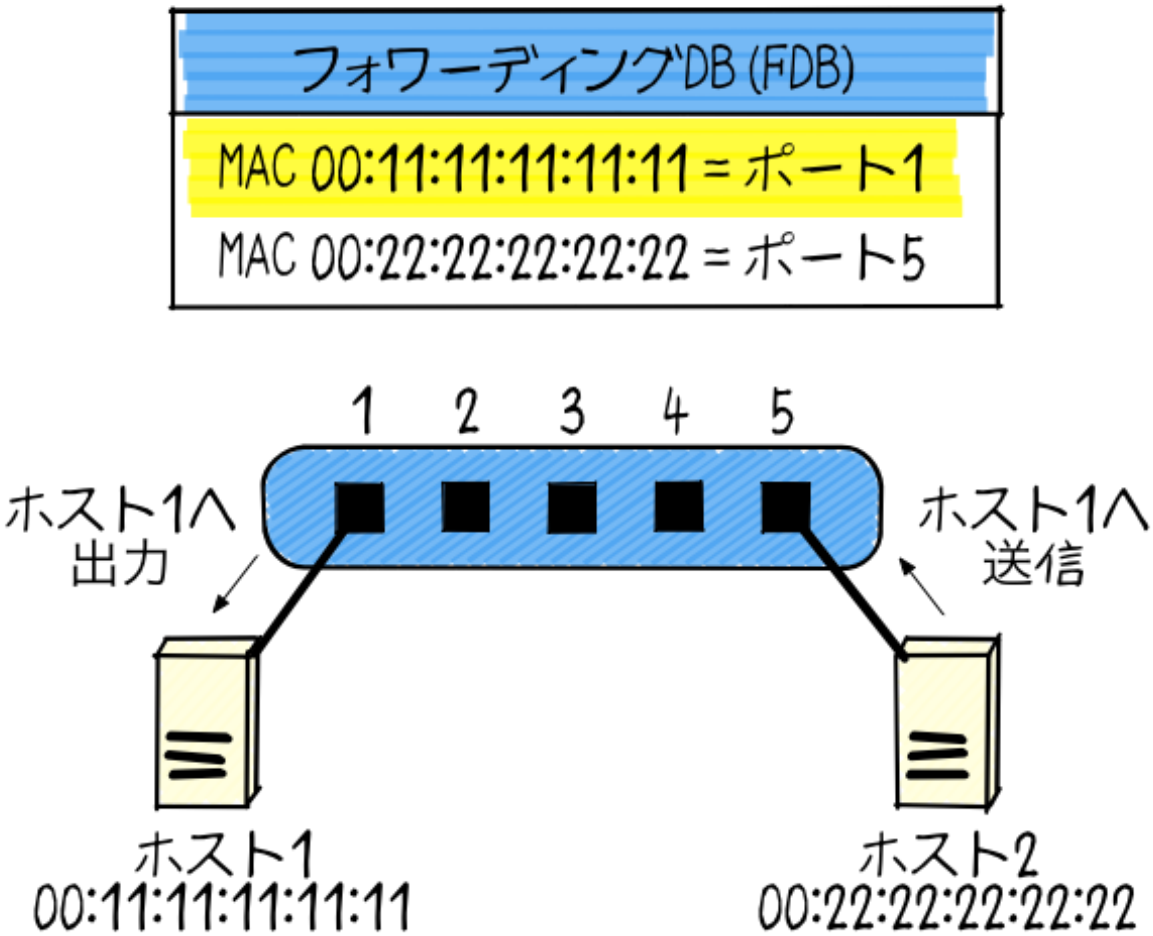
8.1. ##########1#####2##################

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

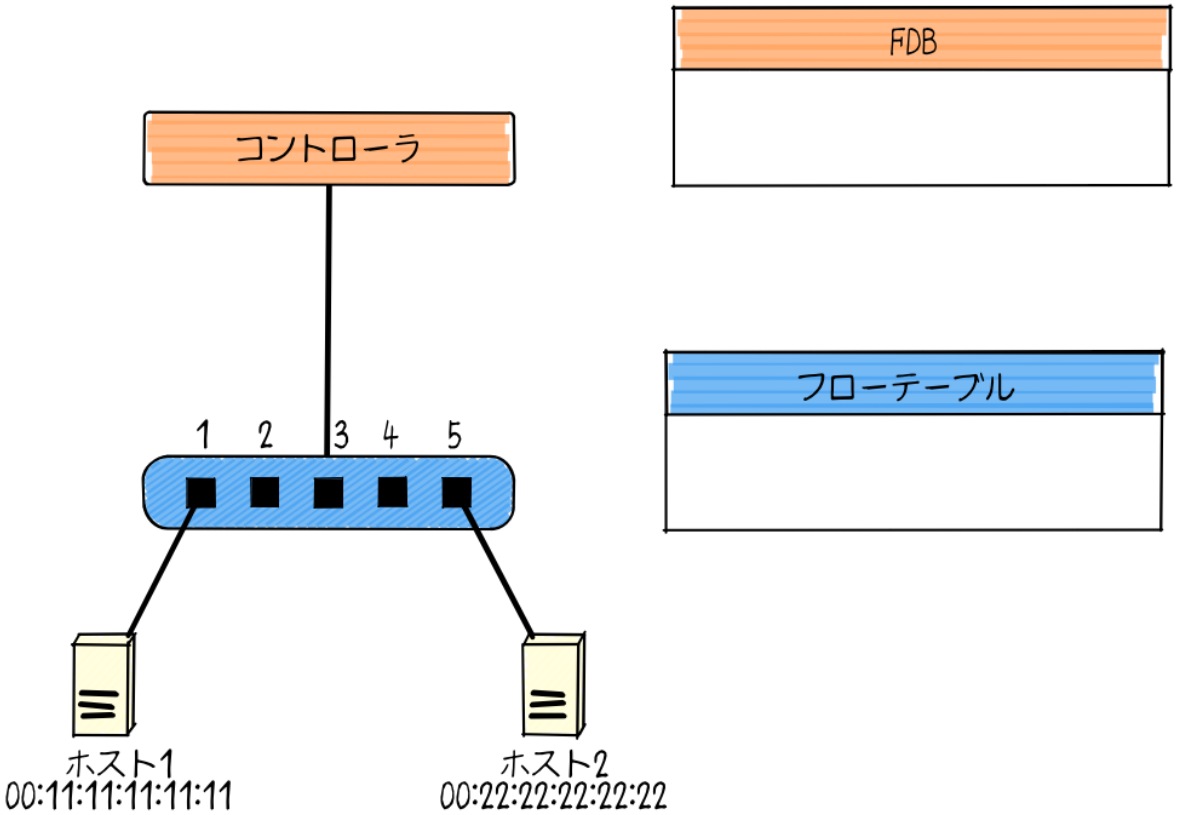
8.2. ################1####

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

8.3. ##################(#########)####

######################### 7#3##############################2####

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



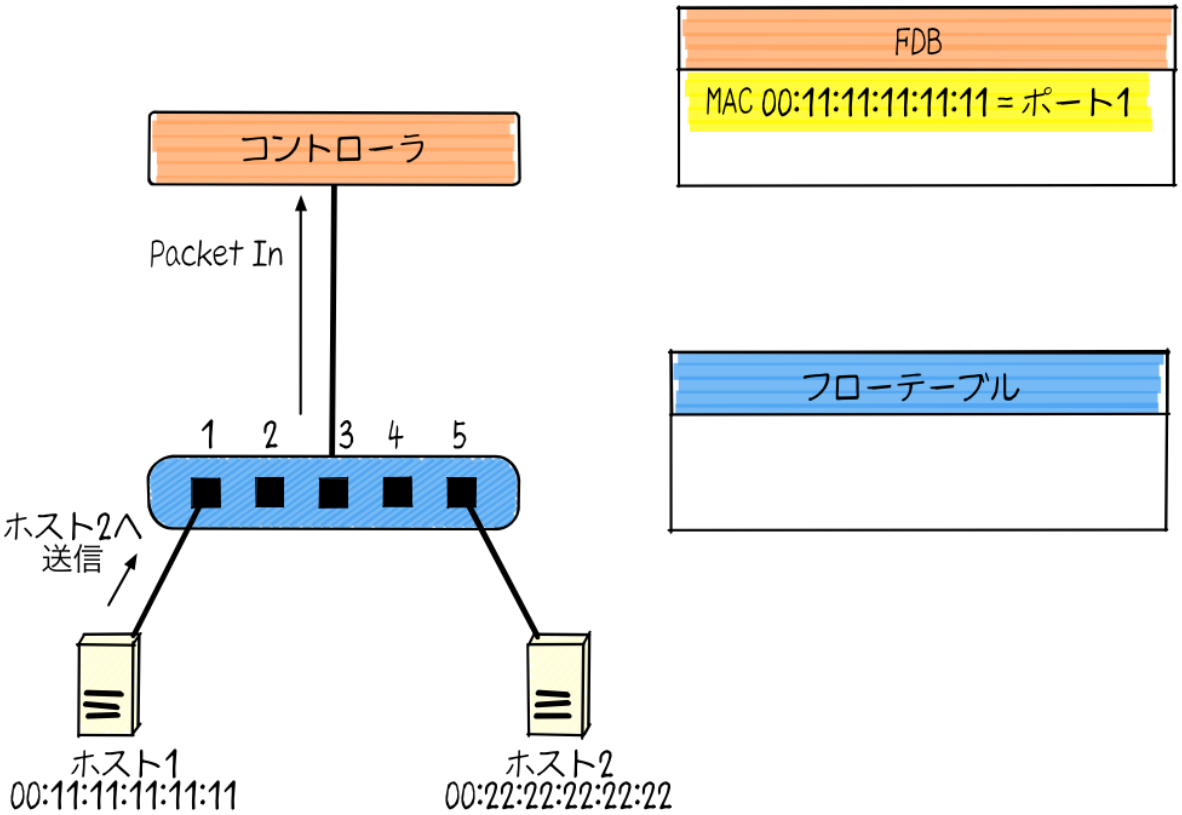
8.3. ##################(#########)###

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

8.3.1. ######

########1####2#########################1##################(# 7#4)#

1. ######################### ###############
2. ############ ##1##########
   #00:11:11:11:11:11####################

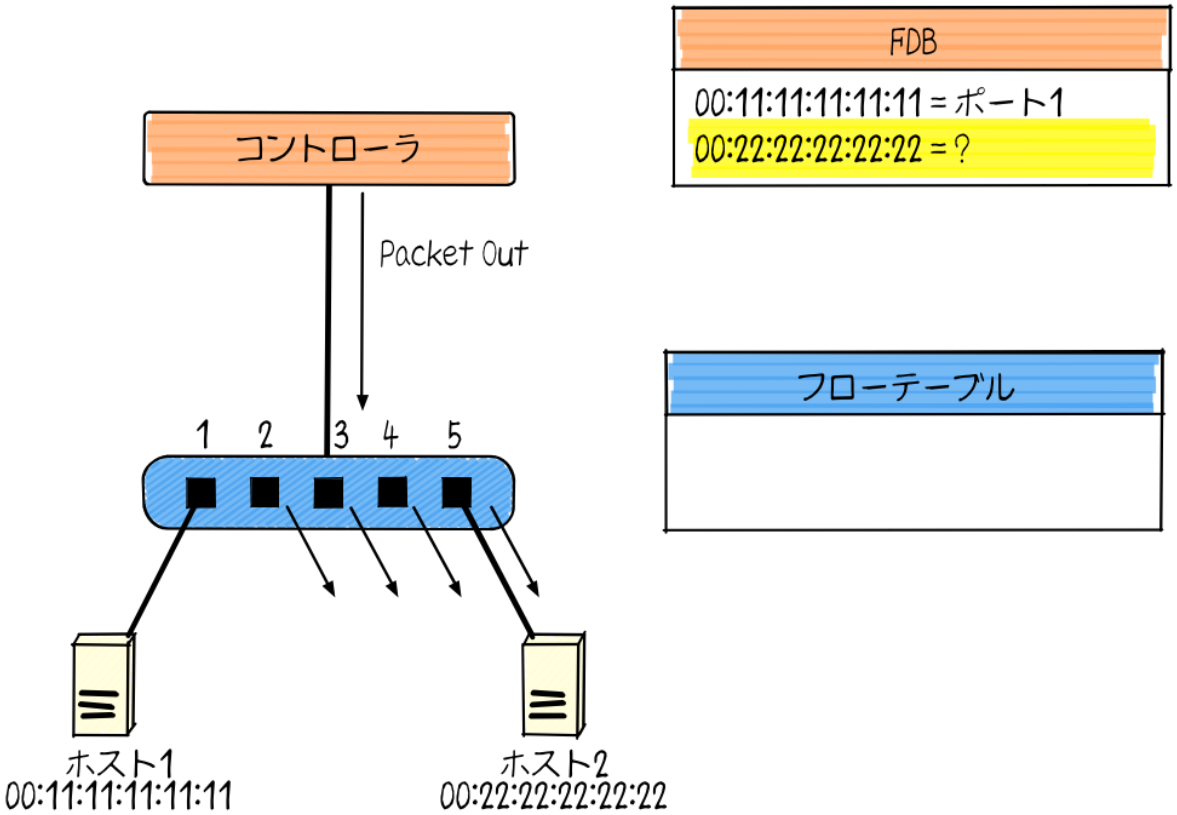


8.4. ######

8.3.2. ###### ###########(#######)

###(# 7#5)#

1. ############# ##2##
2. ################################ ##5#######2########

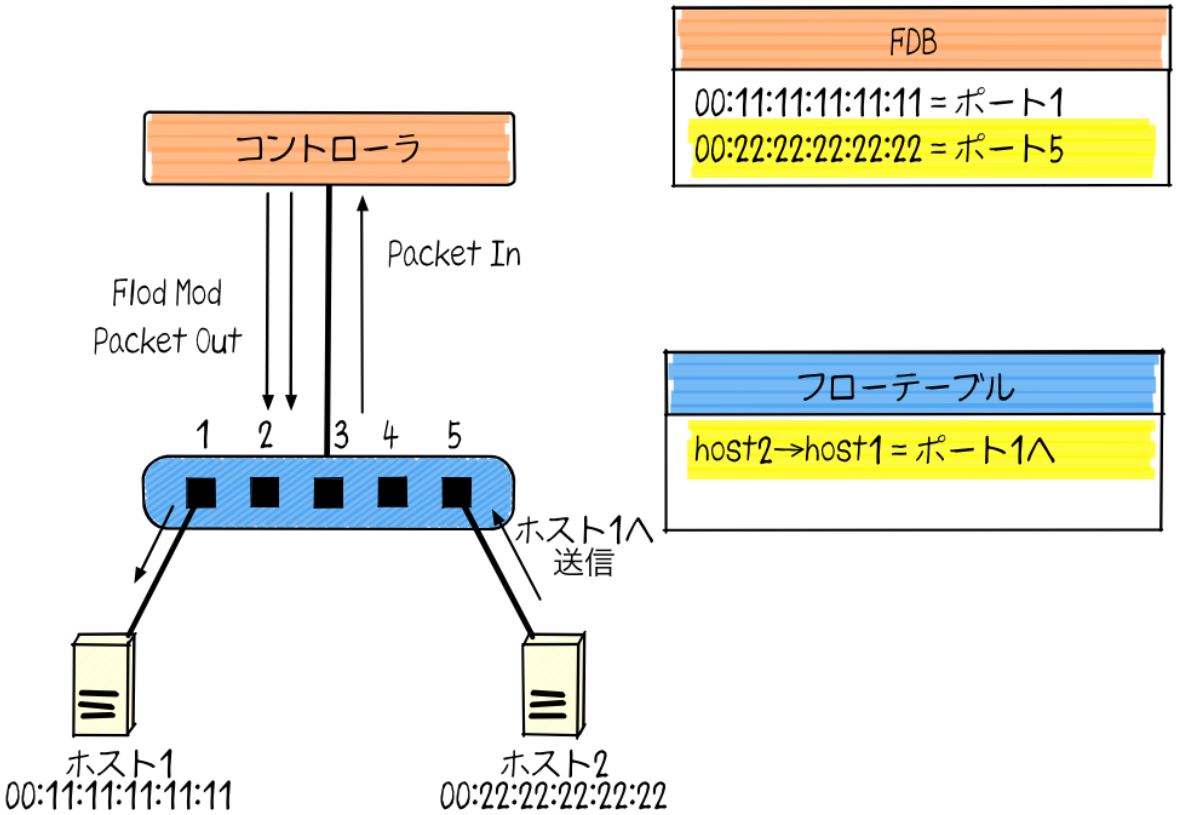


8.5. ## ########

8.3.3. #######(#### ########## ###)

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



8.6. ###2###1#
###

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

######1#####2###
1#####2############# 7#6###############1#####2##########5##################
######################### ##################################

8.4.

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

```
$ 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
```

##

8.5.

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

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

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

8.5.1. #######(###### ##)###

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

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
```

8.5.2. ###### ###

##################1###
############ `send_packet_out` ####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)
)
```

8.5.3.

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
```

8.5.4. ###

########_######.## ##### 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? ###) ######

8.5.5.

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
```

##16

8.6.

##

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

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

9. ########1.3##########

######### ########1.3 #############1.0####################

9.1. ########1.0###############

7#################################

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

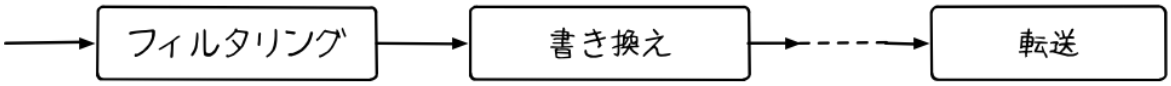
########1.0################ 1 ##
##

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

########1.0################################ ########### switch_ready ########
packet_in
#############

9.2.

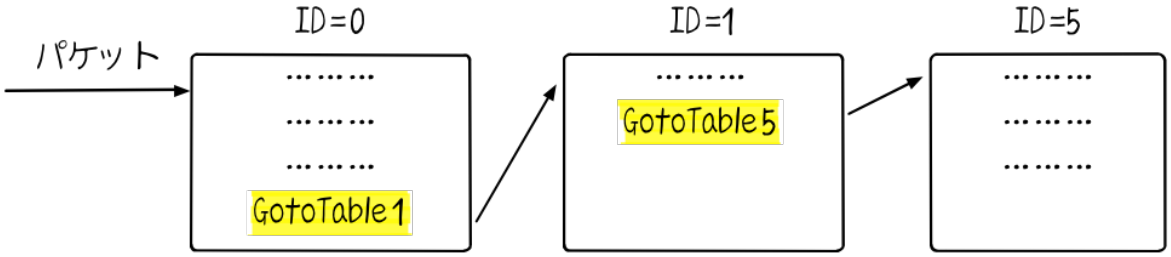
######## 1 #### ########1.0 #############1.3 ##################1.3 ##
1 ##
####################→######→ … →#######################################
##



9.1. ########1.3#######################

9.2.1.

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



9.2. #### ## 0 ##### ########

9.2.2. ########1.3

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

######1############################## ########1.0 ##########################
########### #### ############# # ####, ###6 ################## (#8#1)#

9.1. ######## 1.3 ########### (##############)

##########	##
SetField	###########################
CopyTtlOut	2###########################
CopyTtlIn	###########1#############
SetMplsTtl	###################
DecrementMplsTtl	##############1####
PushVlanHeader	####################
PopVlanHeader	########################
PushMpls	########################
PopMpls	###############################
Group	########################
SetIpTtl	###4###########6#### ###########
DecrementIpTtl	###4###########6#### ######1####
PushPbb	################### (##### ###) ###### ####
PopPbb	######################## (##### ###) #### #######

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

9.2. ######## 1.3 ########### (#######)

##########	##
`SendOutPort`	######### (##) #############
`SetQueue`	`SendOutPort` ######################### ##

9.2.3.

`instructions` ##

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

```
# #### 0 ### 1 ## GotoTable
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
  table_id: 0,
    ...
  instructions: GotoTable.new(1)
)
```

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

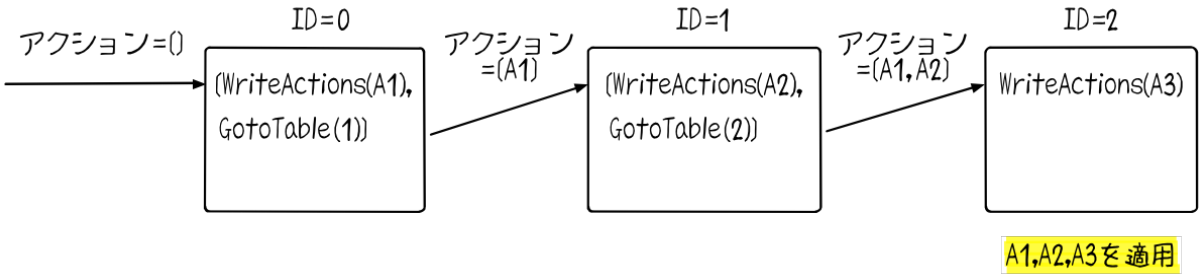
- `Apply` #####################
- `WriteActions` ##############################

`Apply` ##1.0 # #### ### # `actions` ### ###############

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

```
# ### 1 ####
send_flow_mod_add(
  datapath_id,
    ...
  instructions: Apply.new(SendOutPort.new(1))
)
```

WriteActions ##################################### ################## WriteActions ################################### ######## ################ ##



9.3. ############

###
WriteActions ################## Clear #####################################

9.3. ######## 1.3

##############	##
GotoTable	##########################
Apply	##############
WriteActions	######################
Clear	#############
WriteMetadata	########### 64### ##########
Meter	##################

9.3. ########1.3 ## ######

########1.3############################ ########### ########1.0 ############## ##1.3#######################
SendOutPort.new(:controller) (############## ######## ####) ####################
##

9.4. ########1.3###############

########1.3##################2##############################

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

######
    ##

9.5.

########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
```

9.5.1. ######_#####

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

9.5.2. ######_##

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

9.6.

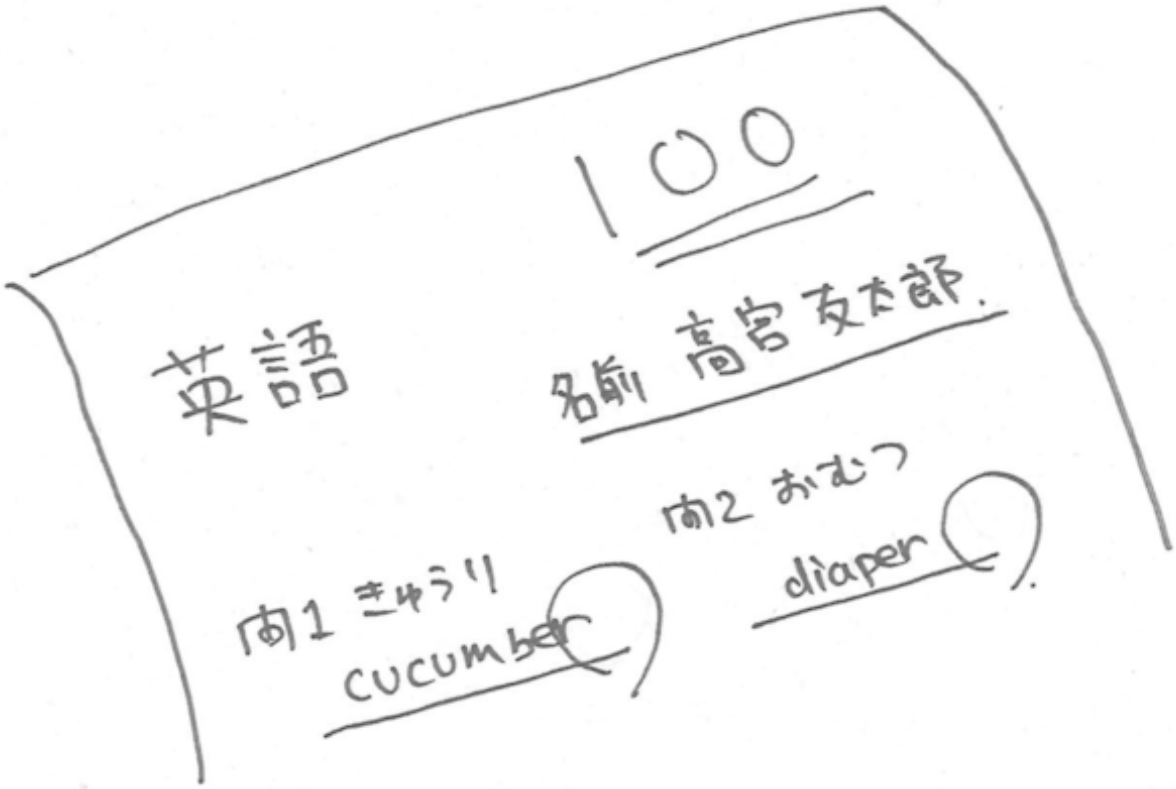
######### ########1.3 #################1.0 ##############

- ##
- `GotoTable` ################1#######################
- ########1.3 ######## ###### ## ####################1.0 ################# `packet_in` #################

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

10. #####

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



10.1.

##
#########

##
##
##
##

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

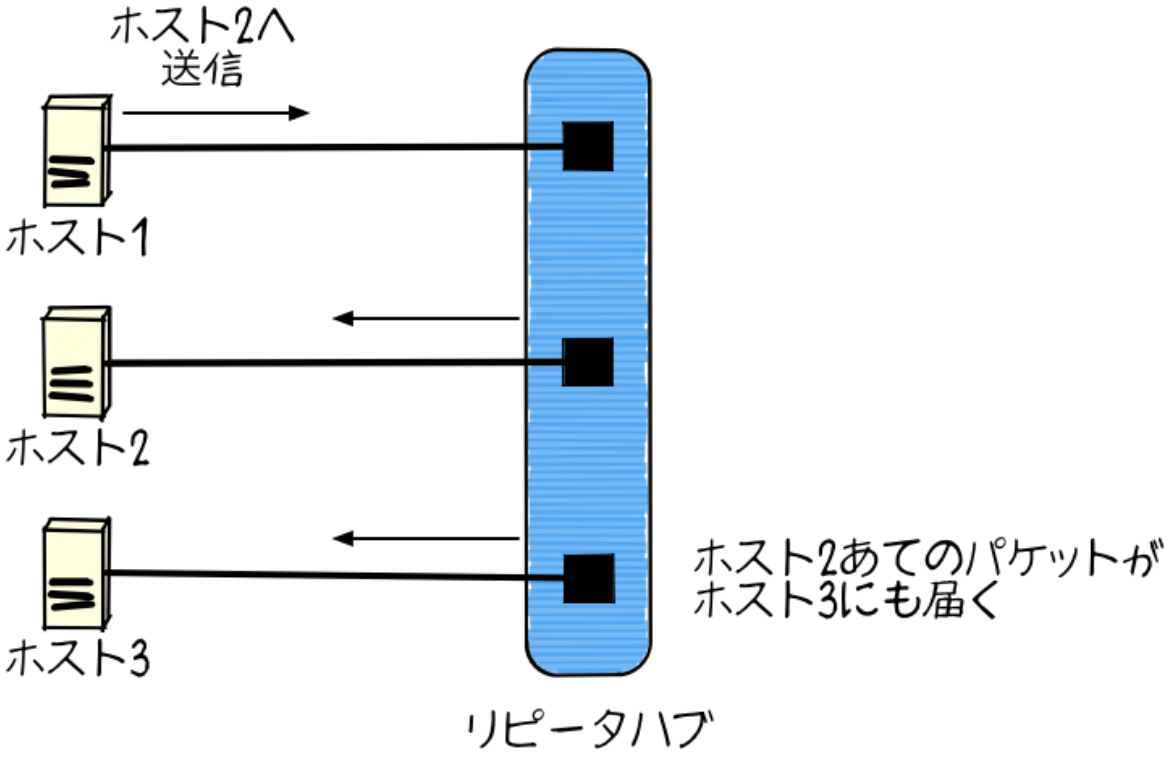
#####################

> ##2###########

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

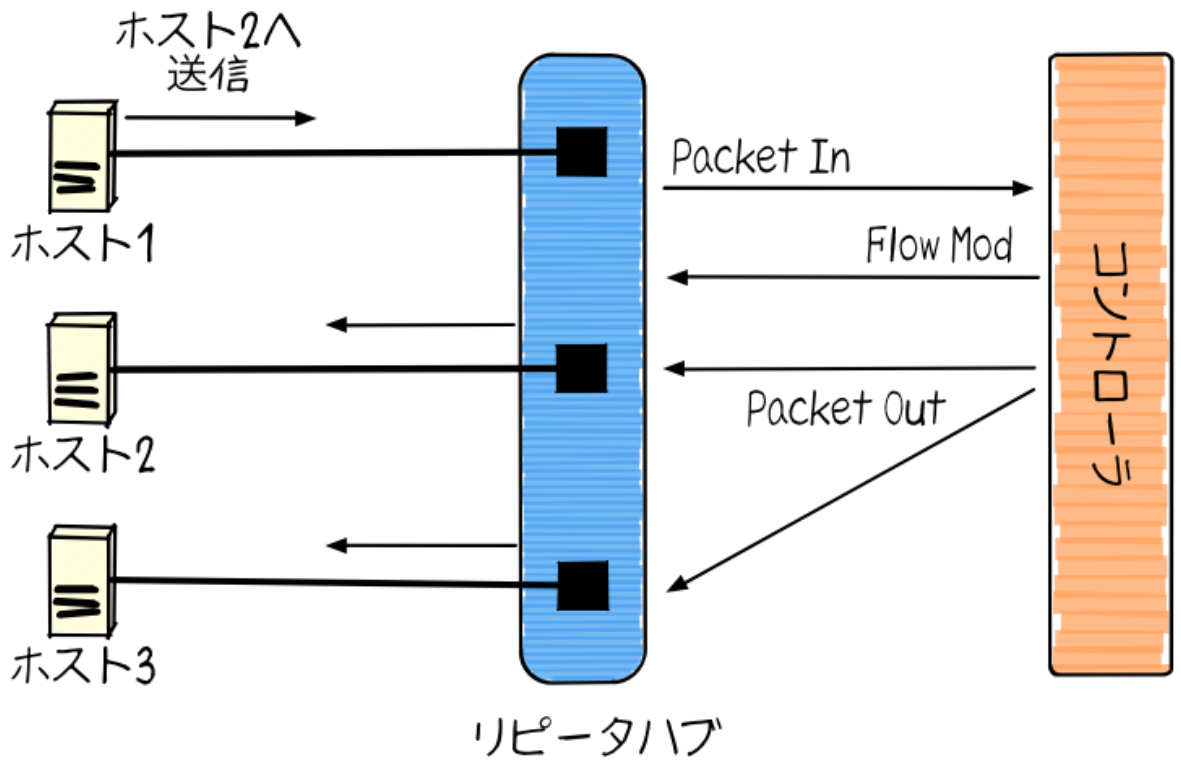
10.2.

#################################### 3 ####### 9#1################### 1 ####
2 ## 3 #### 2
################################### (7 ###################) #### ### #########
##



10.1. ### 3

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



10.2. ########

10.3.

##
##

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

> ##
> ## (######################################)####################
> ###### (######################)##############

(######) ####### ########
[2]

> ##
> ##

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

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

[1] ####://#############.###/#########/153234/###########################
[2] #####://############.###/#####/3159####################

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

##

1. ### 1#### 2#### 3 ##########
2. ####################
3. ### 1 #### 2 ##########
4. ### 2#### 3 ##########

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

10.4.

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

########[3]
    ##
#####[4]
    ##
#####/########_####_###########[5]
    ##

10.5.

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

1. ### 1#### 2#### 3 ##########
2. ####################
3. ### 1 #### 2 ##########
4. ### 2#### 3 ##########

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

[3] #####://########.##
[4] #####://######.###/########/#####
[5] #####://######.###/#####/########_####_###########

- #####: ### 1#### 2#### 3 ##############################
- ####: ### 1 #### 2 ##########
- ####: ### 2#### 3 ###########

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

10.5.1. #####:

######### (#####) ######################### 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
  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
```

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

###

10.5.2. ####:

####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
```

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

10.5.3. ####:

2#### 3 ############################

```
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
```

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

10.6.

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

###
###

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

10.7.

###2####

- ####################/########_####_#####################################
  ###########
- ####################3###
  #################
- ######################## reek # flog # flay # rubocop ########################

########################### (features/ ##) ##################################

10.8.

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

11.

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

11.1.

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

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

###
###
###

11.2.

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

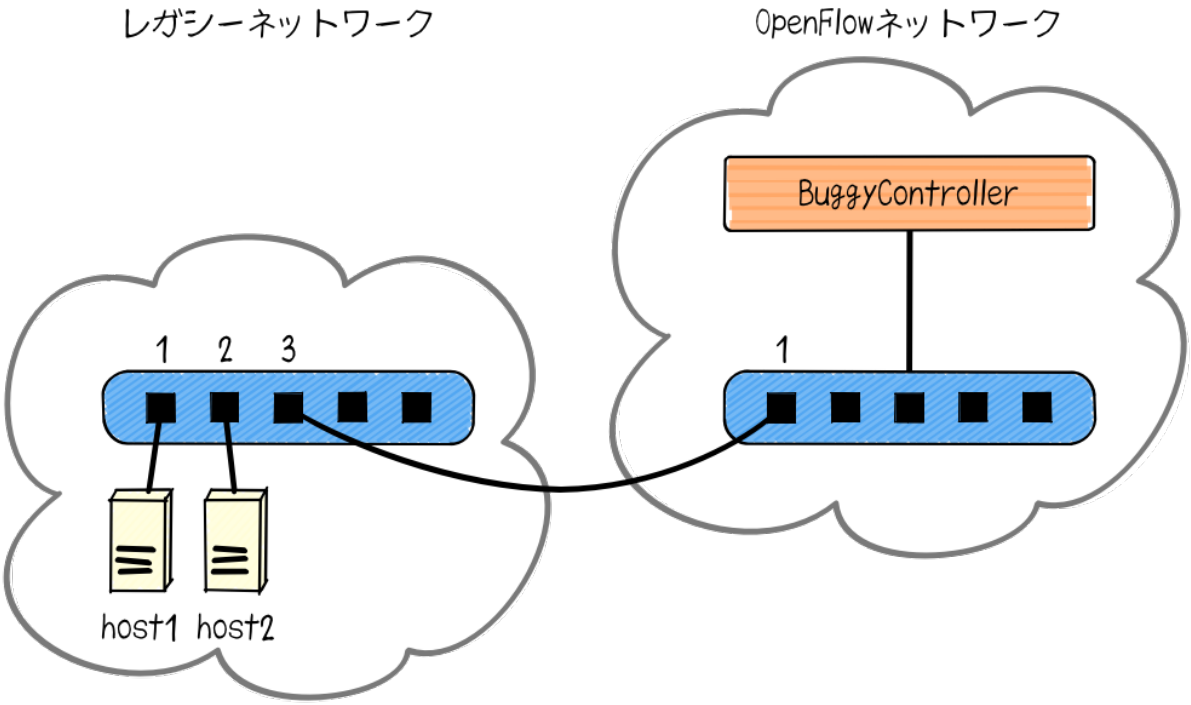
##
##
##
########

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

11.3.

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

##
##10#1#########



11.1.

##################################2################3##################1###
###(###################
#)##########

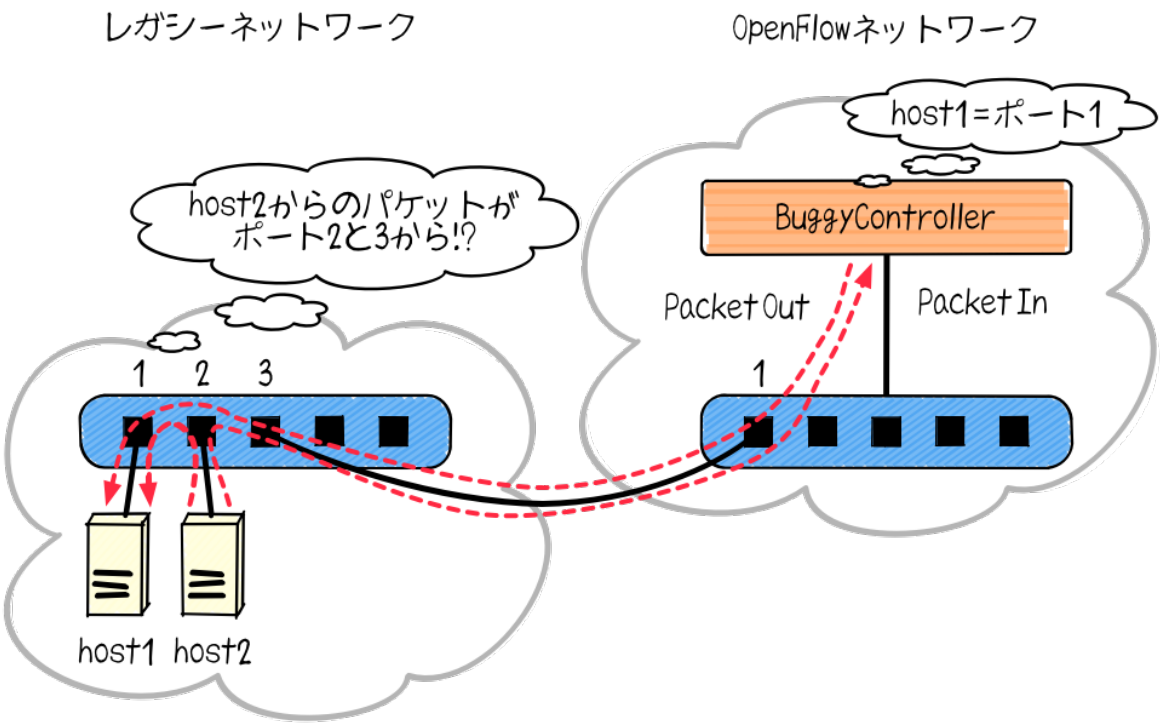
11.3.1. #########

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

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

11.3.2.

#######10#2##########################



11.2.

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

###

11.3.3.

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

1###1######################### ######### ###### ################################ assert ##############################(9 ####### ##########)###

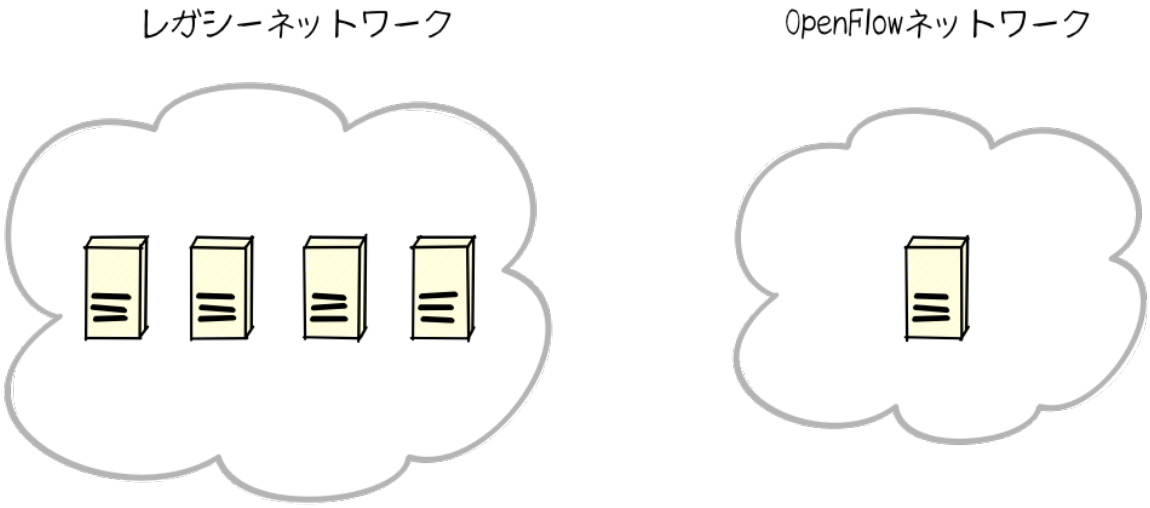
###

11.4.

###3###

11.4.1.

##1#########################(#10#3)#######################################



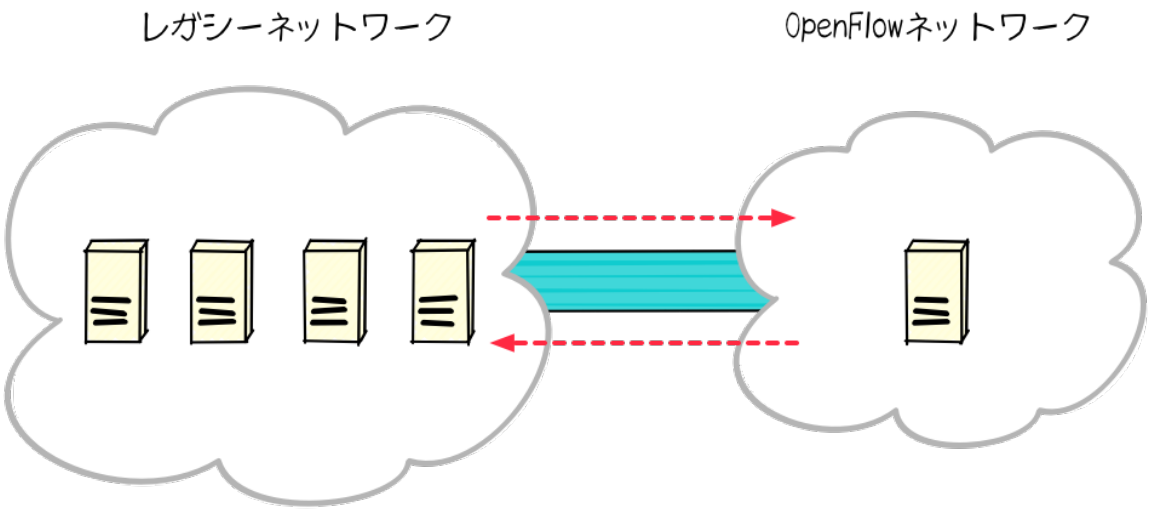
11.3.

###

###
###
##

11.4.2.

###10#4##



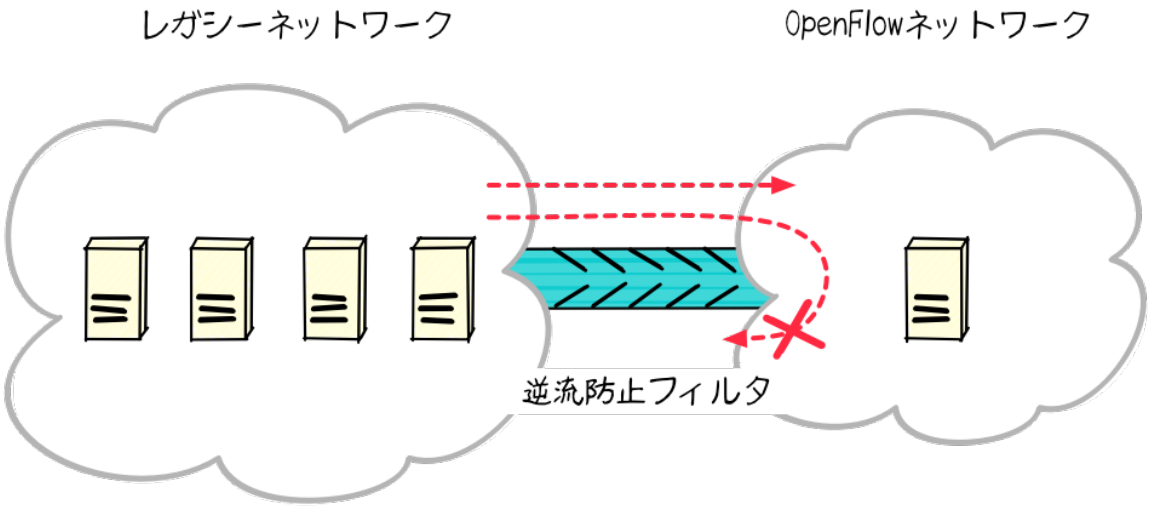
11.4.

##
########

##
##
##

11.4.3.

##################2################2#################################
#######################################10#5##



11.5.

##########################→######## ####################################
##################

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

11.5.

##
##

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

11.5.1.

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

```
$ 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,
```

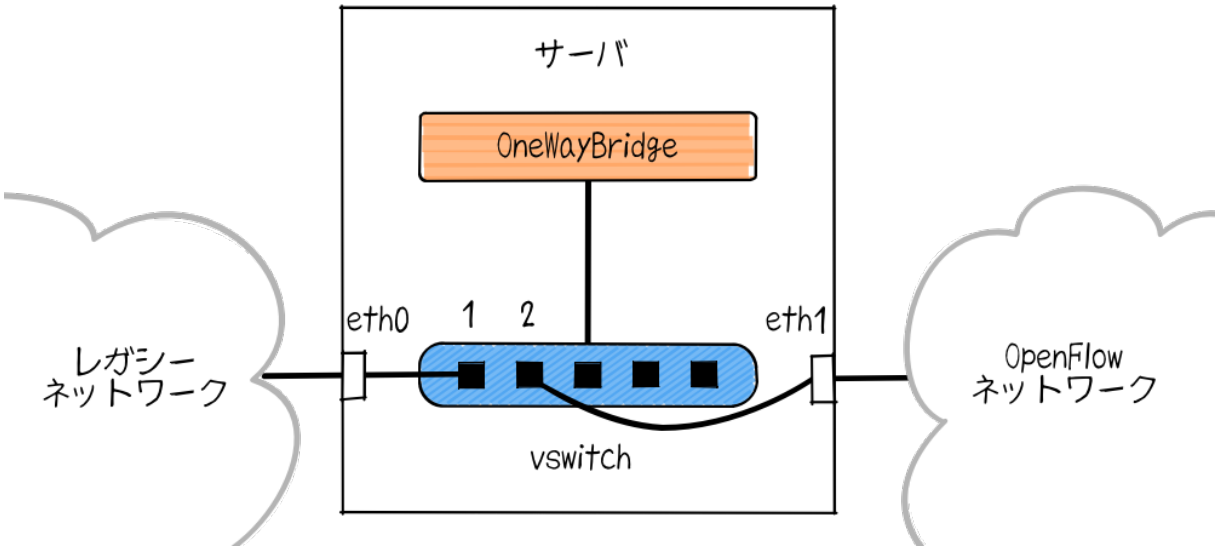
```
      idle_timeout: 10 * 60,
      match: Match.new(in_port: in_port, source_mac_address: source_mac)
    )
  end

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

11.5.2.

############2#################################(#######)################### (#10#6##



11.6.

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

11.5.3.

###5######100########
###
###
##############################

11.6.

##

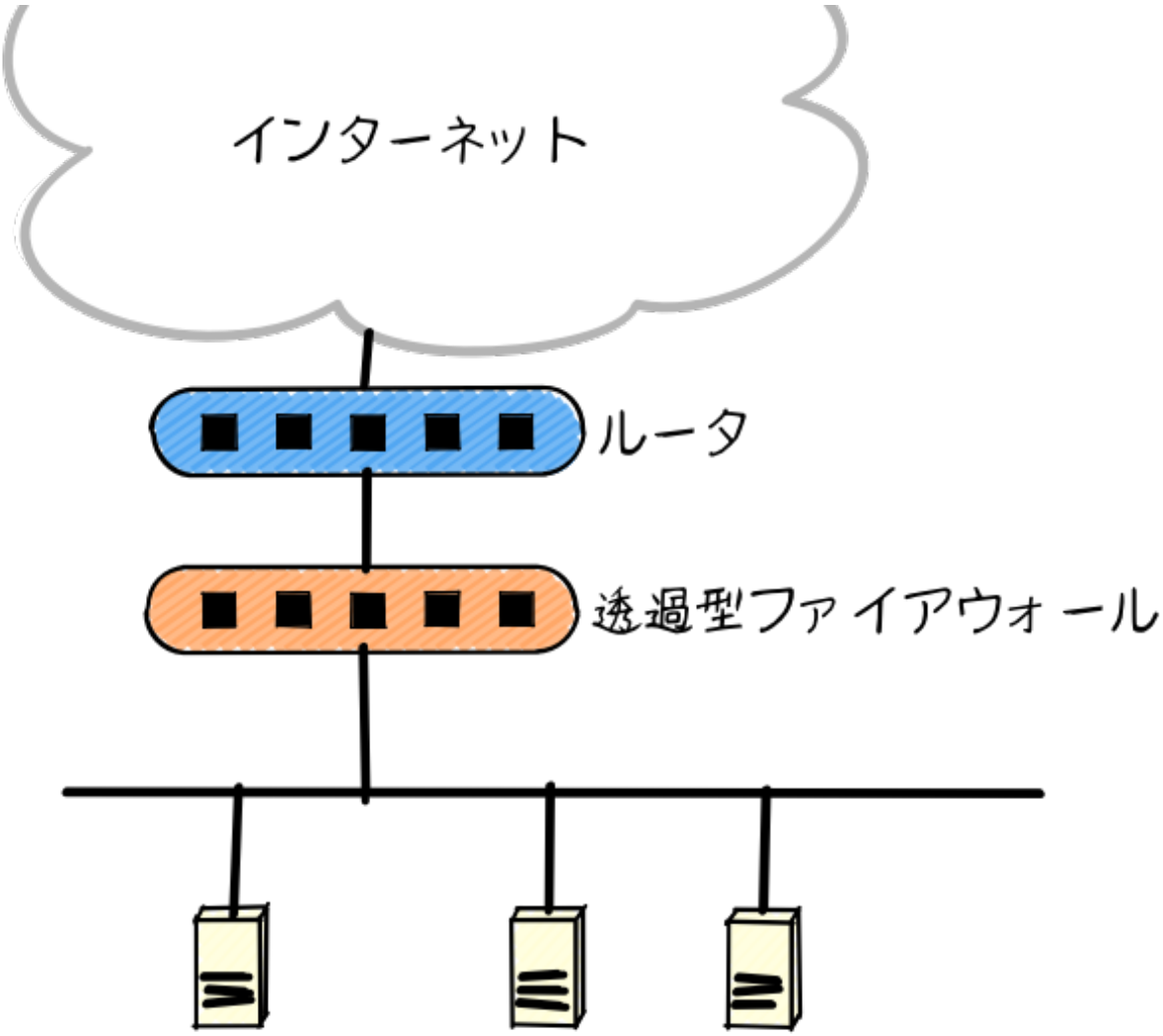
- # # # # # # # # # # # # # # # # # # #

12.

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

12.1.

################################### 11#1 ####################################
###



12.1.

################4#####################################2#################

########1918

###1918###
###

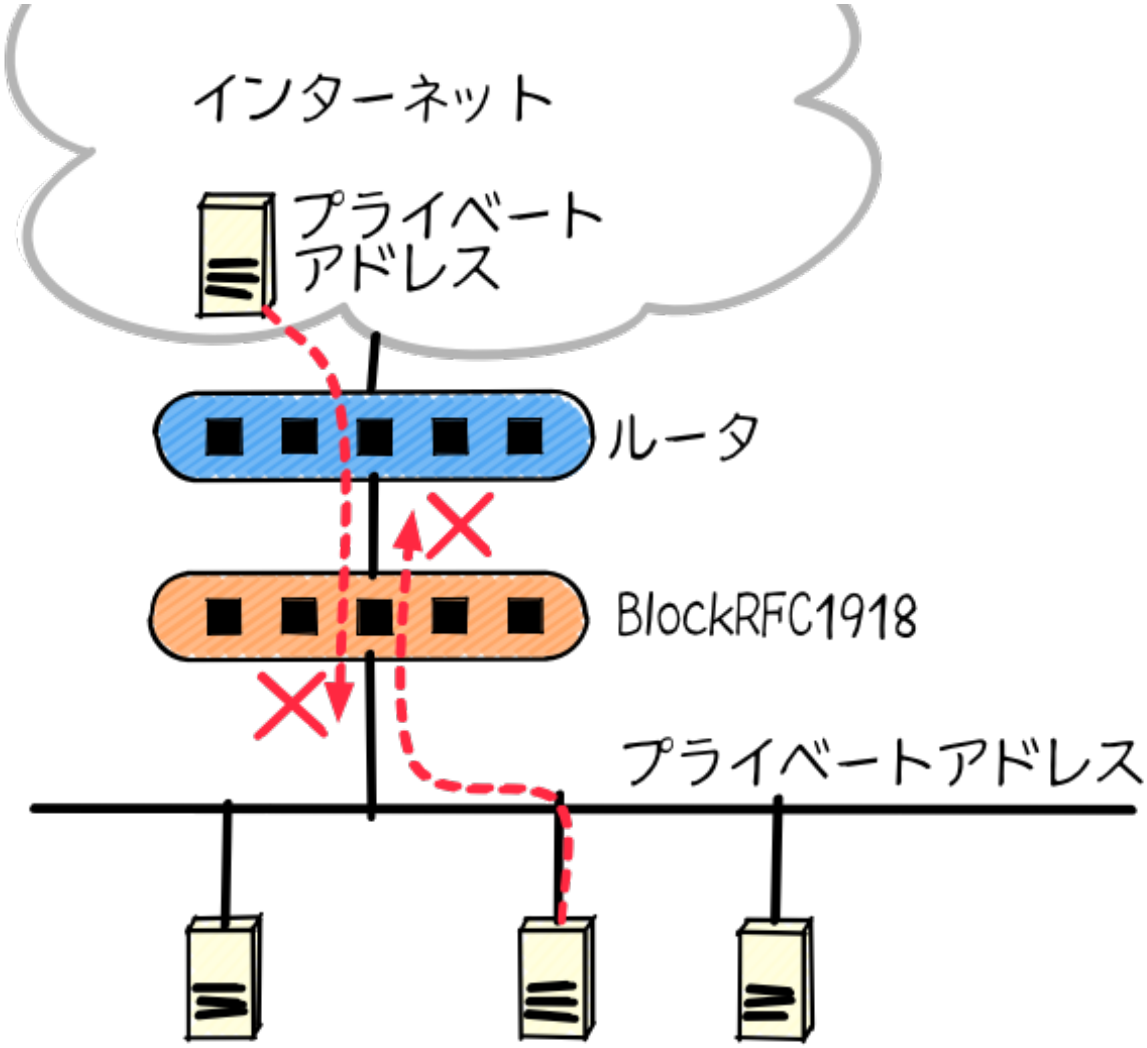
#############

################################→#################

12.2. ########1918######

########1918############### ## ########################## (# 11#2)############
###1918 (##############) ####### 3 ## ## #########

- 10.0.0.0/8
- 172.16.0.0/12
- 192.168.0.0/16



12.2. ########1918##############################

12.2.1.

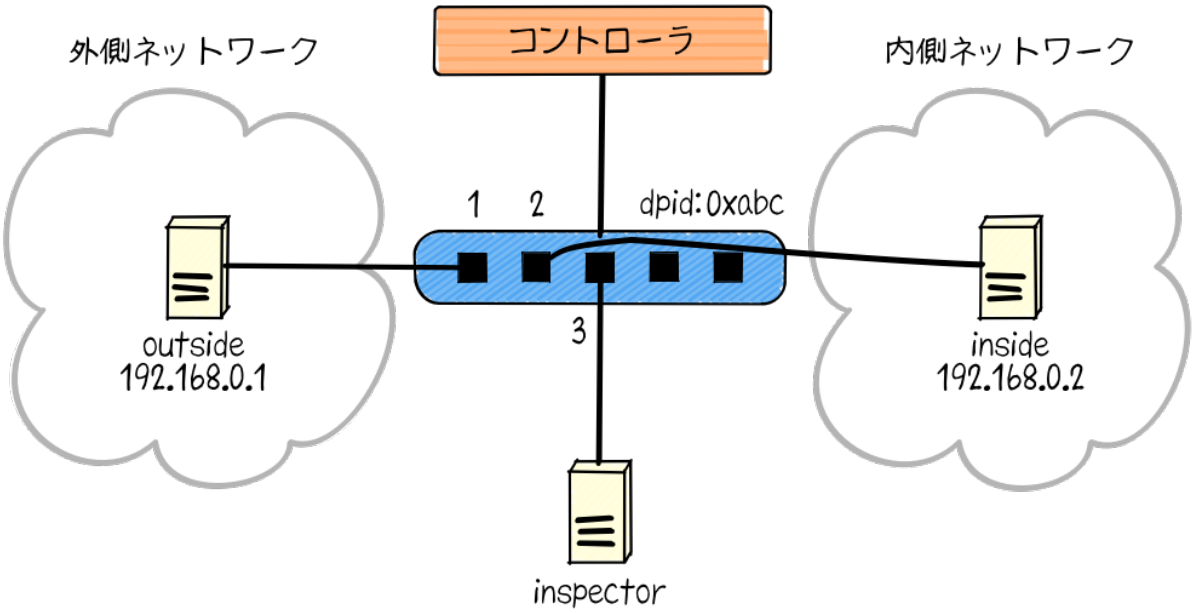
############ ########1918 ##################################### ###### # trema/transparent_firewall ##### (#####://######.###/#####/###########_########) ### ##########

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

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

```
$ cd transparent_firewall
$ bundle install --binstubs
```

######################1#######3############ trema.conf ####### (#11#3)#



12.3. ########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 ###### ######### ########

12.3. ########1918#######

########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.##)

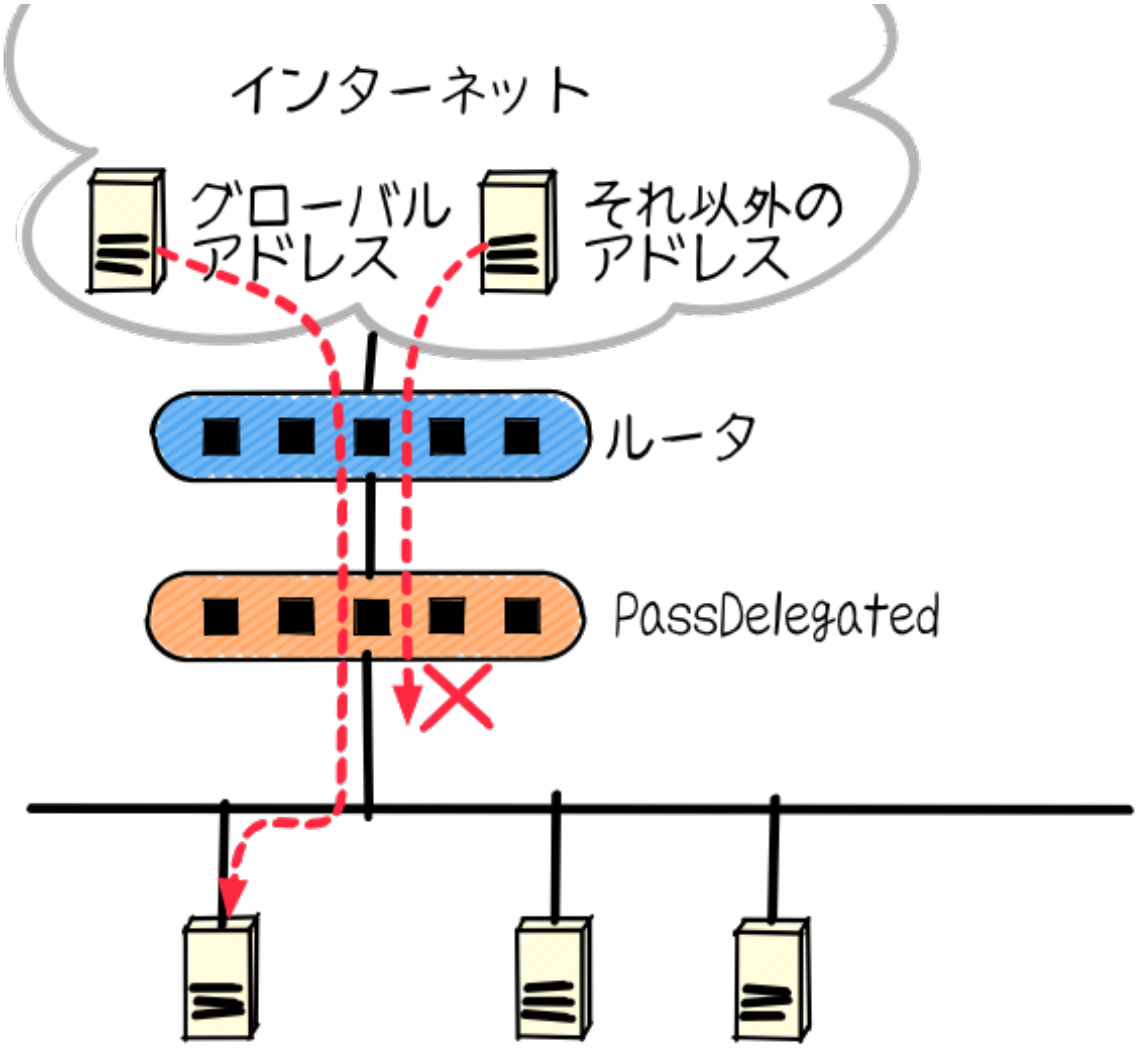
```
def barrier_reply(dpid, _message) ❶
  return if dpid != @dpid
  logger.info "#{@dpid.to_hex}: loading finished"
end

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` ###

12.4.

(#11#4)#



12.4. ##########################→##########################

################ ## ####### 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
...
```

12.4.1.

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

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

12.5.

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

12.6.

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

- ##
- #### ### ################### `Barrier::Request` ########

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

13. ### (##)

##

13.1.

##

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

1

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

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

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

13.2.

###1###

###

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

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

2

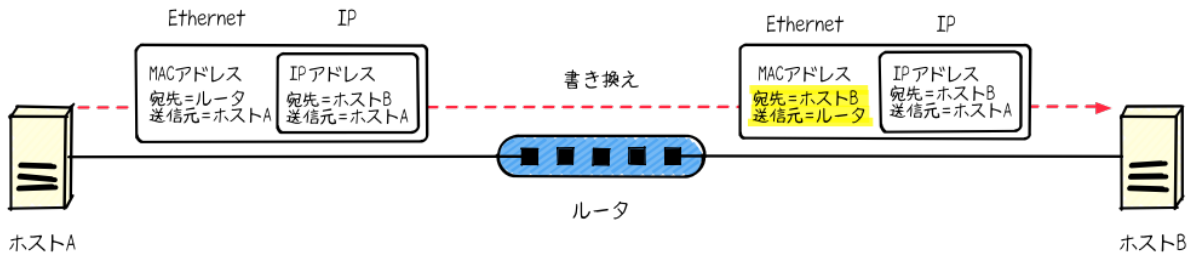
13.3.

2

13.3.1.

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

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



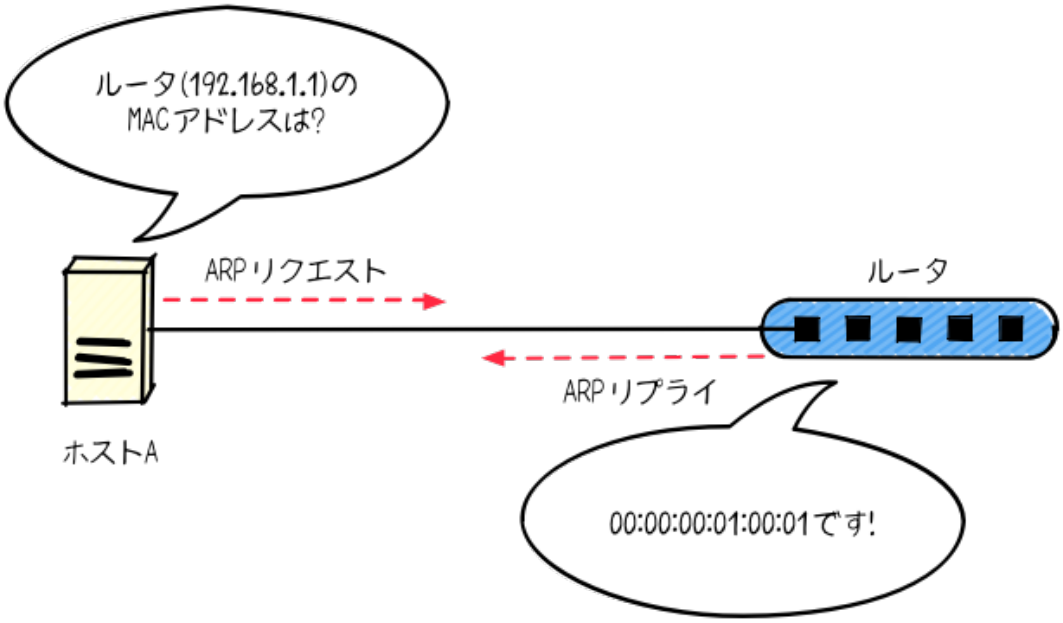
13.1.

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

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

########

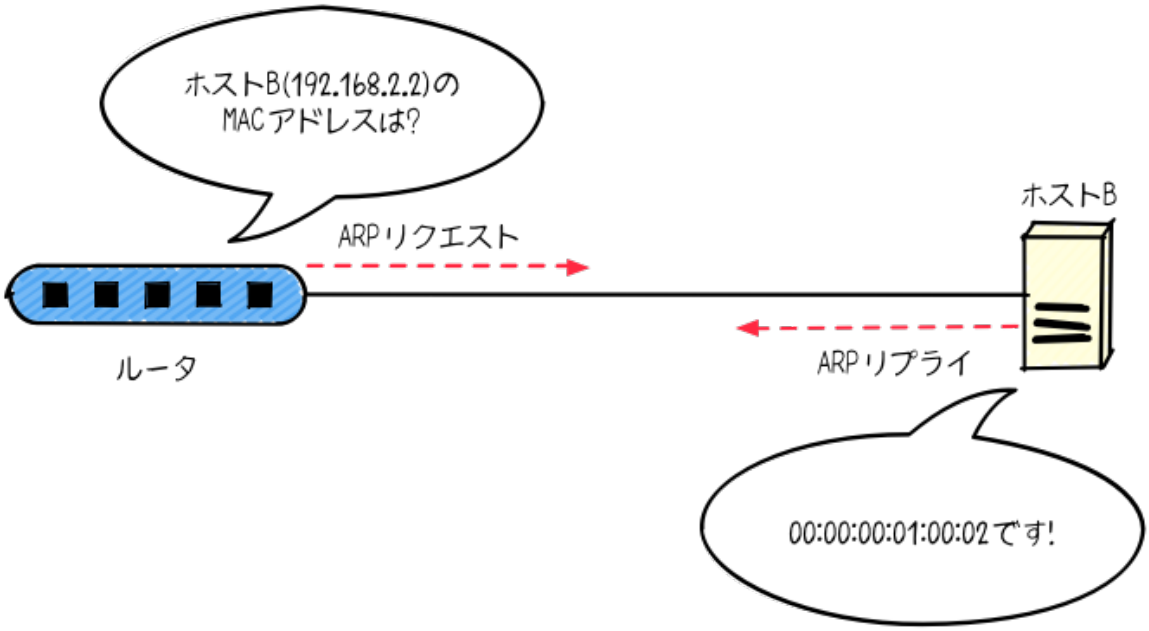
######################### ### ##
###(####### ########## ########)#####################################2######
########## # ############### ### ##### ### ############## ### ################
(# 12#2)#



13.2. #### ### ########### ###

########

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

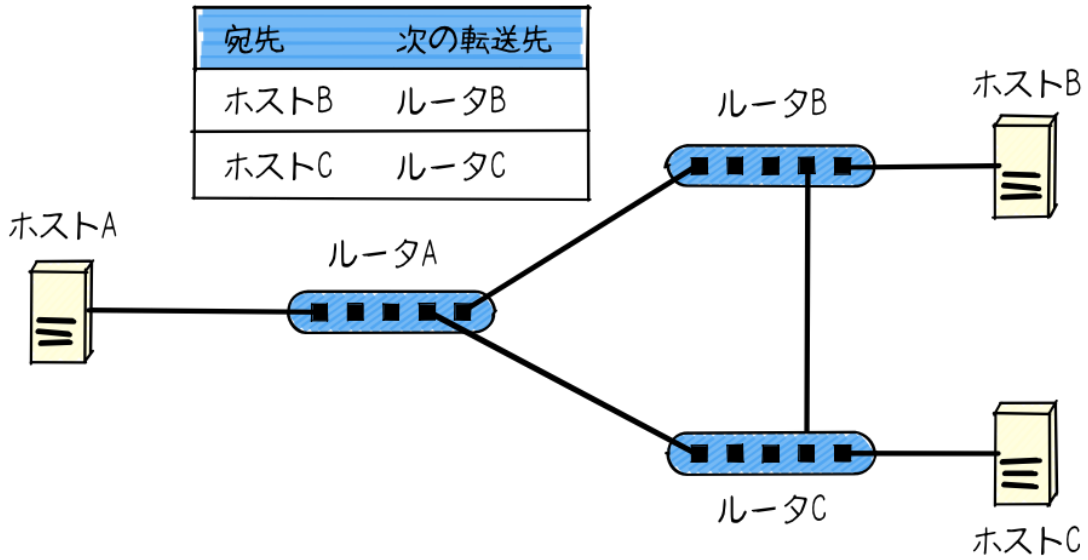

ホストB(192.168.2.2)の
MACアドレスは?
ARPリクエスト
ホストB
ルータ
ARPリプライ
00:00:00:01:00:02です!

13.3. ###### ###

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

13.3.2.

############################## (# 12#4)######### # #### # ################ # ##### ############################ # #### # ######################## # ###### # ####### ###### # ########### # ########



13.4.

########

12#4

###

13.4.

####### (SimpleRouter) ## (lib/simple_router.rb) ################ ###### # trema/simple_router ##### (#####://######.###/#####/######_######) #############

```
$ git clone https://github.com/trema/simple_router.git
$ cd simple_router
$ bundle install --binstubs
```

13.4.1. ###### ##

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

#########

`packet_in_ipv4` ################ ### #### ######## 3 ###############

1. #############
2. ## ## #############
3. ######### (#######)

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

```
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 ##### ###

13.4.2.

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

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

```
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)
```

13.4.3. ###

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
```

######

13.5.

##

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

##13 ##

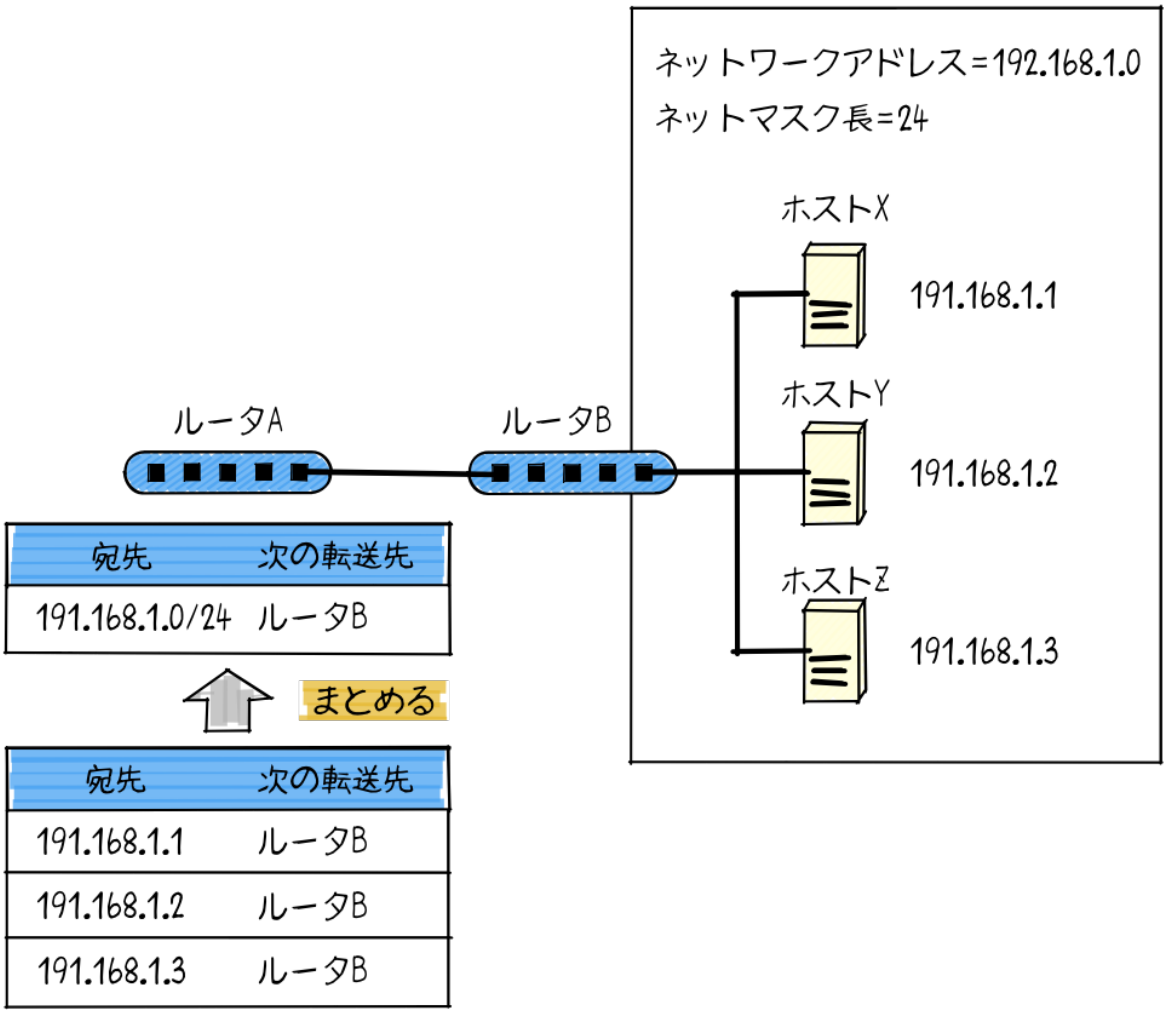
14. ### (##)

##

14.1.

##1#################
###
################################2016#####10################################
##########

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



14.1.

##########################13#1#######################192.168.1.0#########24
##(###192.168.1.0/24######)#################,#,#################24#############
##########192.168.1.1####################,#,####1######192.168.1.0/24###########

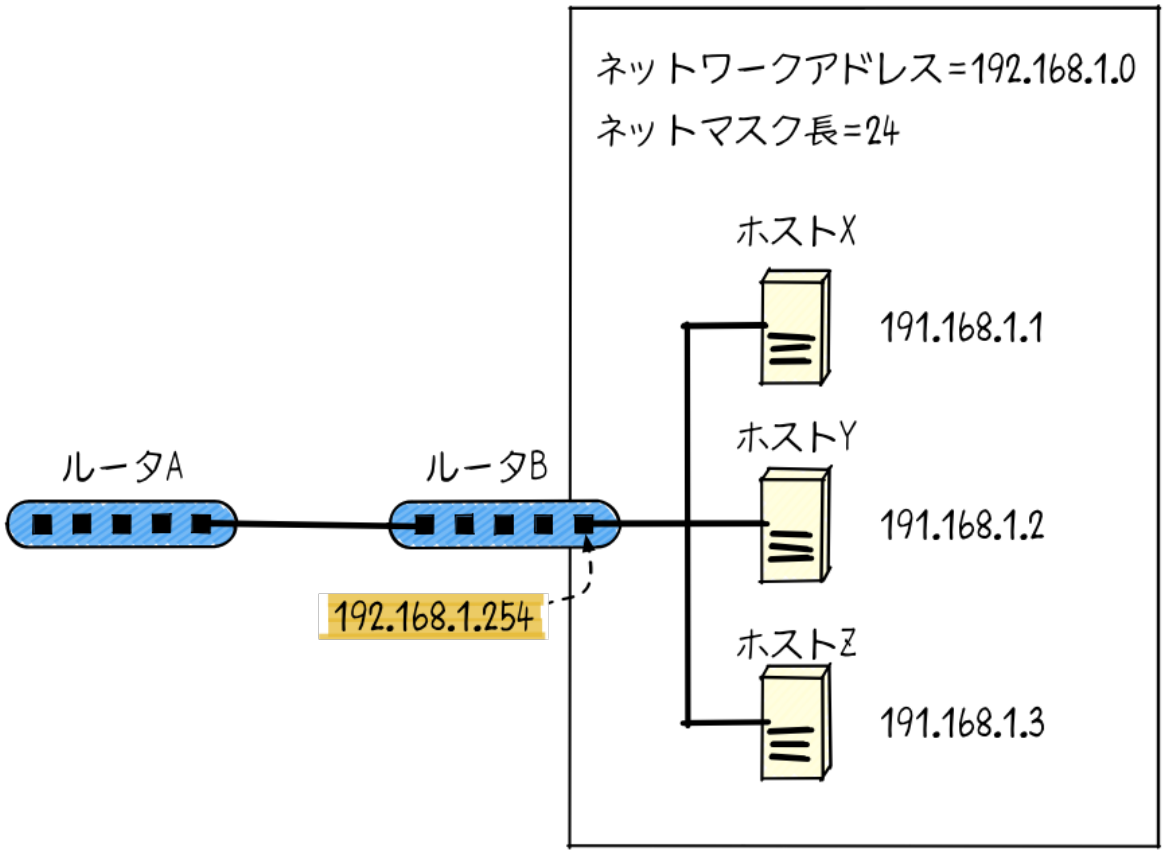
##################################13#1##################,#,#########
192.168.1.0/24####################1############

#########(192.168.1.1)##192.168.1.0/24
#########192.168.1.1####24###
##,####################1#####3##############

14.1.1.

#13#1 ##/####################

################################ ## ###################### ## ############## ################## ## ##########13#2 ##### # ############## #, #, # ############ ############## 192.168.1.254 ########

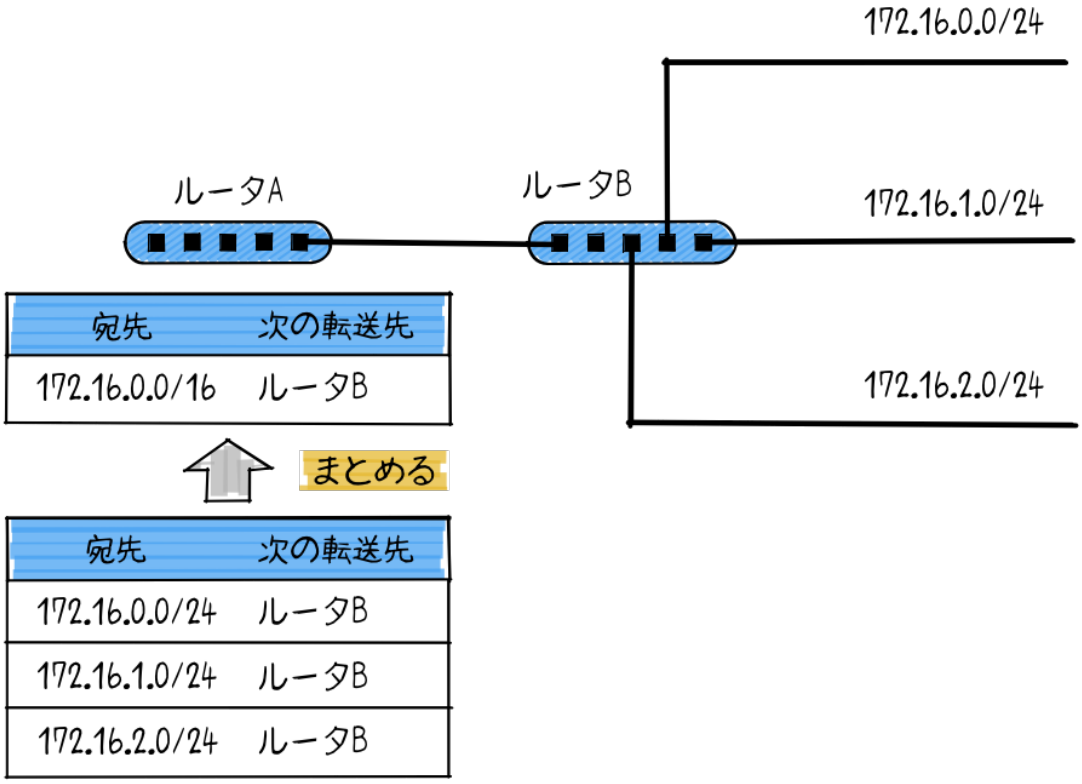


14.2. ## ## #####

#13#2 #### # ##### # (192.168.1.1) ######################### # ############## ####################################192.168.1.254 ########################### ################### ######## ### ################ #

14.2.

##

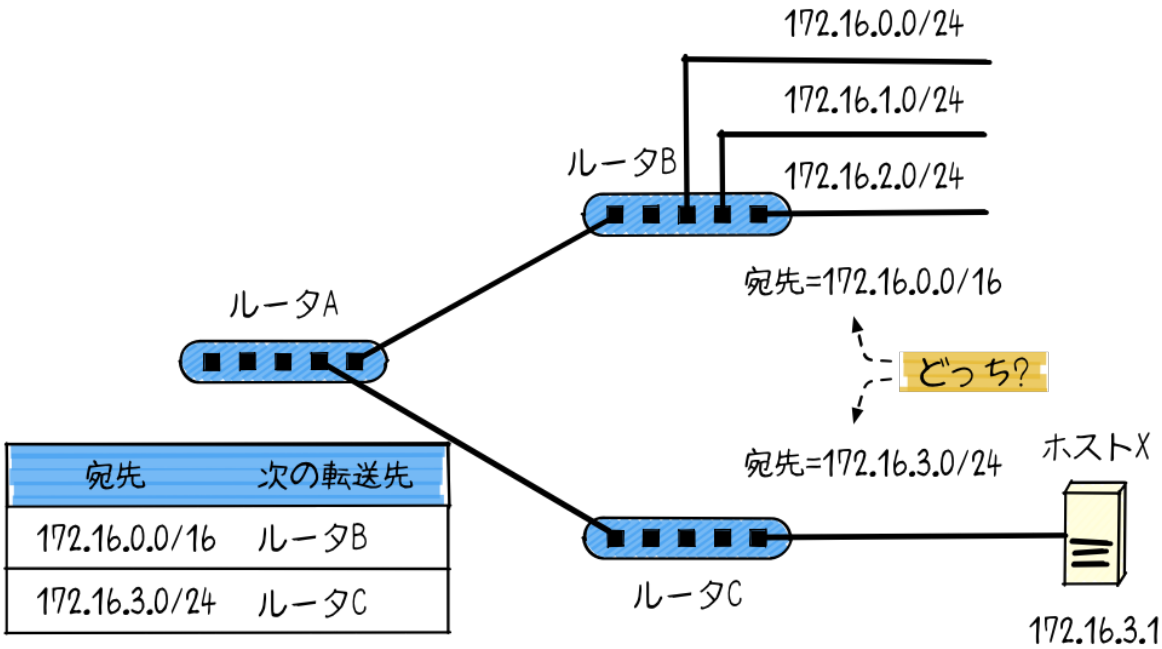


14.3.

13#3#3#############################3################16####172.16.0.0#
###################3#####################################3################
###172.16.0.0/16####1##########

14.2.1. 1####################

####### ## ##############################13#4 #### # #### # (172.16.3.1) ########
################ # ################## # ##### 3 #######################13#4###
2 ################################ 172.16.3.1
###########################

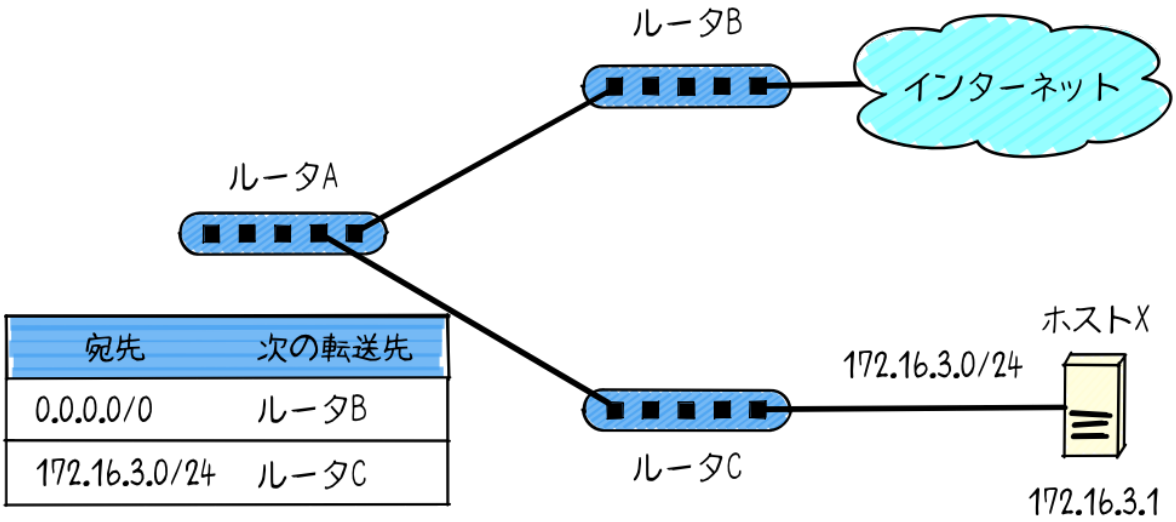


14.4.

##
##

14.2.2.

#################################### 0.0.0.0/0 ##############################
0
###



14.5. 0.0.0.0/0

#13#5#### #### #### #

```
            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)
```

###

14.3.2. ########## (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` ####### ## ###### #####

14.3.3.

`simple_router.conf`

_ #### .####

```
# Simple router configuration
module Configuration
  INTERFACES = [
```

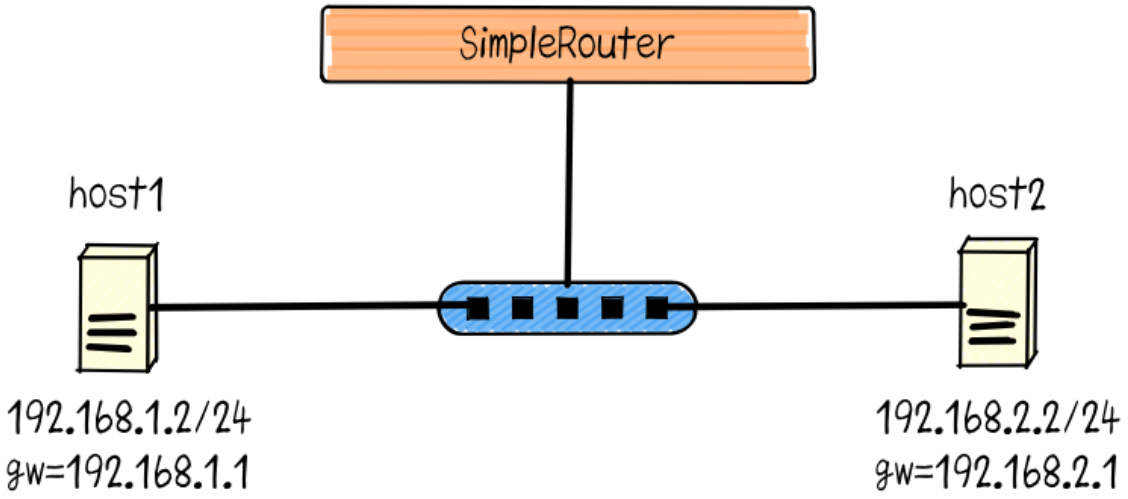
```
    {
      port: 1,
      mac_address: '01:01:01:01:01:01',
      ip_address: '192.168.1.1',
      netmask_length: 24
    },
    {
      port: 2,
      mac_address: '02:02:02:02:02:02',
      ip_address: '192.168.2.1',
      netmask_length: 24
    }
  ]

  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) ### ####

14.4.

##



14.6.

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 ### ###:[#### + #] ###

14.4.1. ####

########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
```

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

14.4.2. #####

###########

```
$ 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
```

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

14.5.

##

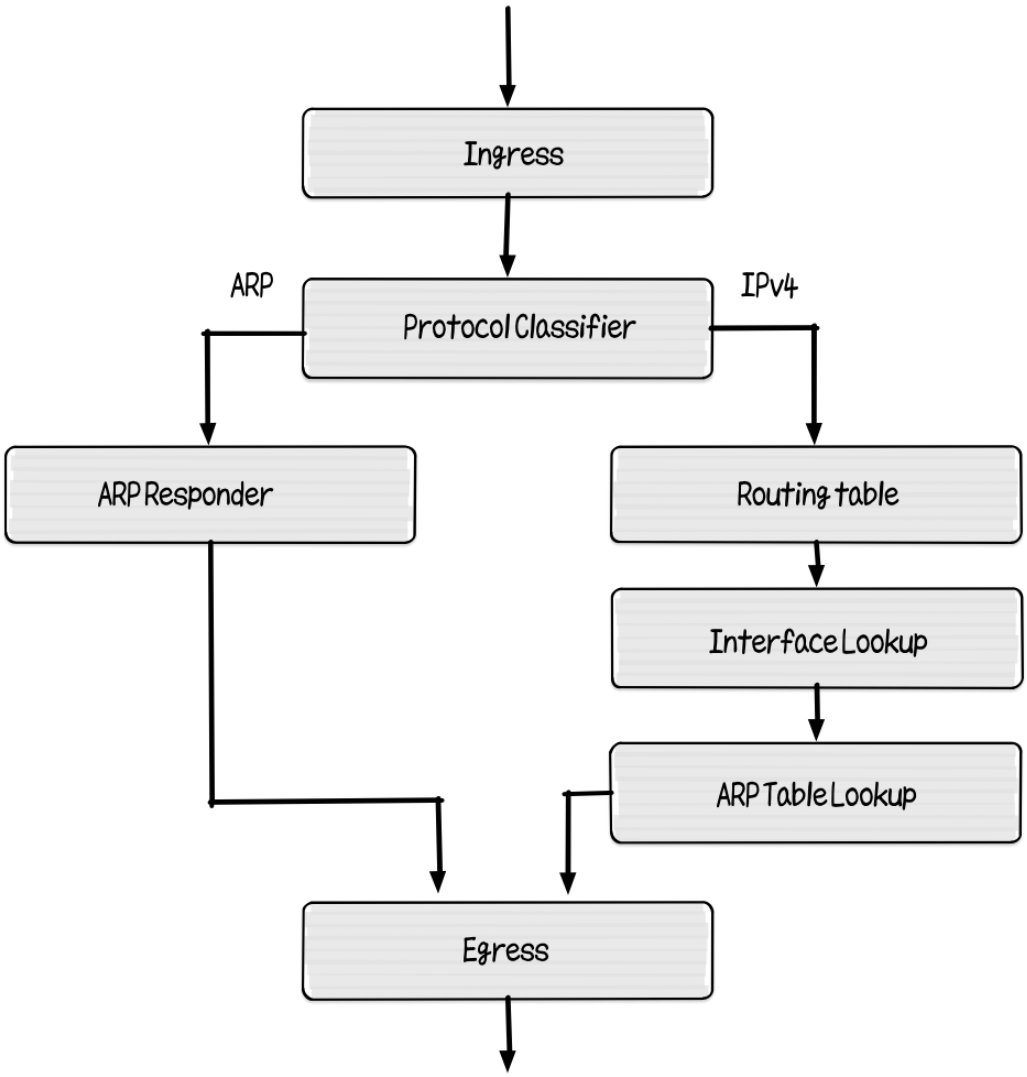
- ##################(#############)#1######(#############)#################
  #
- ##
- ## (########) ##
- ##############0.0.0.0/0###
  #####
- ##

15. ### (##########)

########1.3 ##

15.1.

############### 14#1# 7 ################### ################## ### # ###4 ####
2 ##############

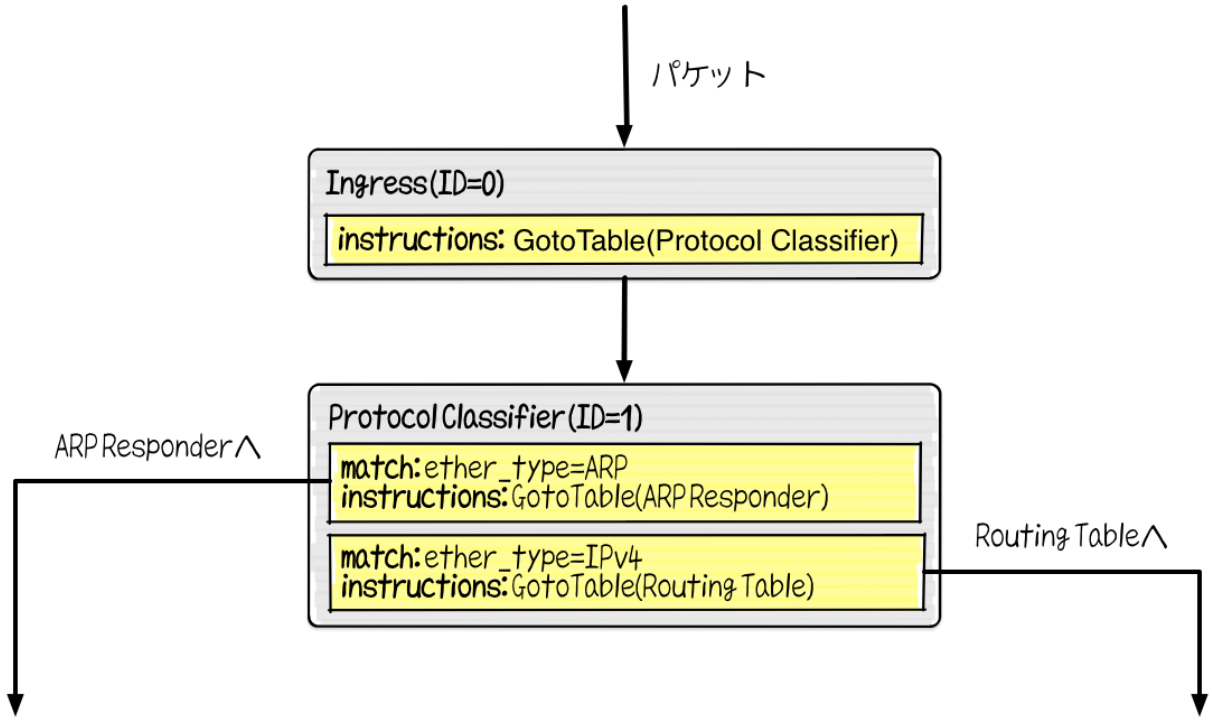


15.1.

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

15.1.1. ####### ############## ##########

############ ## # 0 ## ####### ######### (# 14#2)#



15.2. ########### ## = 0 # ####### ########### ######## ##########

###########

######## ######### ############# ### ###### ether_type ######### ### ##### ### ######### #########4 ##### ####### ##### ########################

15.1.2. ### #########

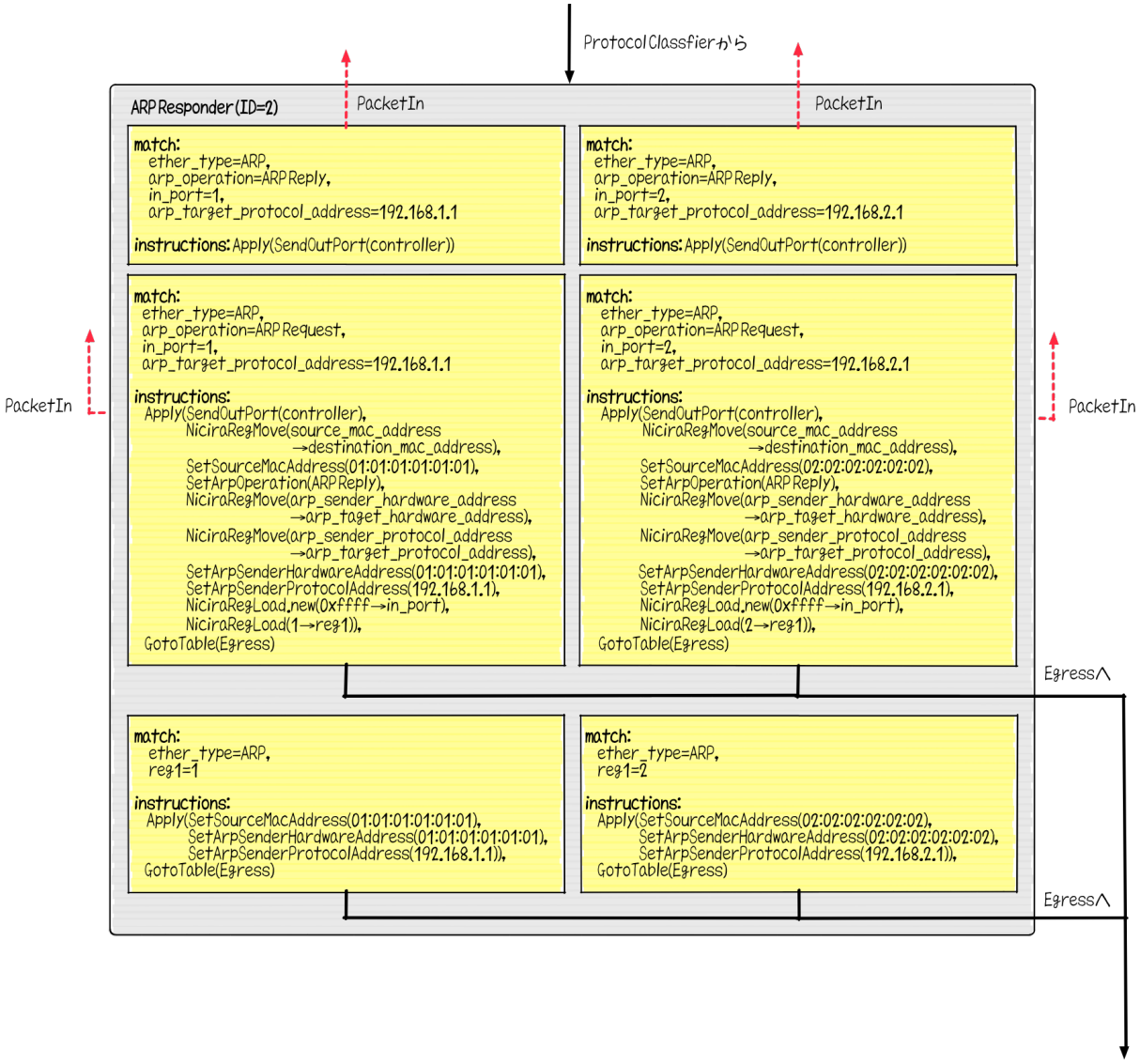
################

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

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

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

3 #####×########################### 2 ######## 14#3##### ########### 6

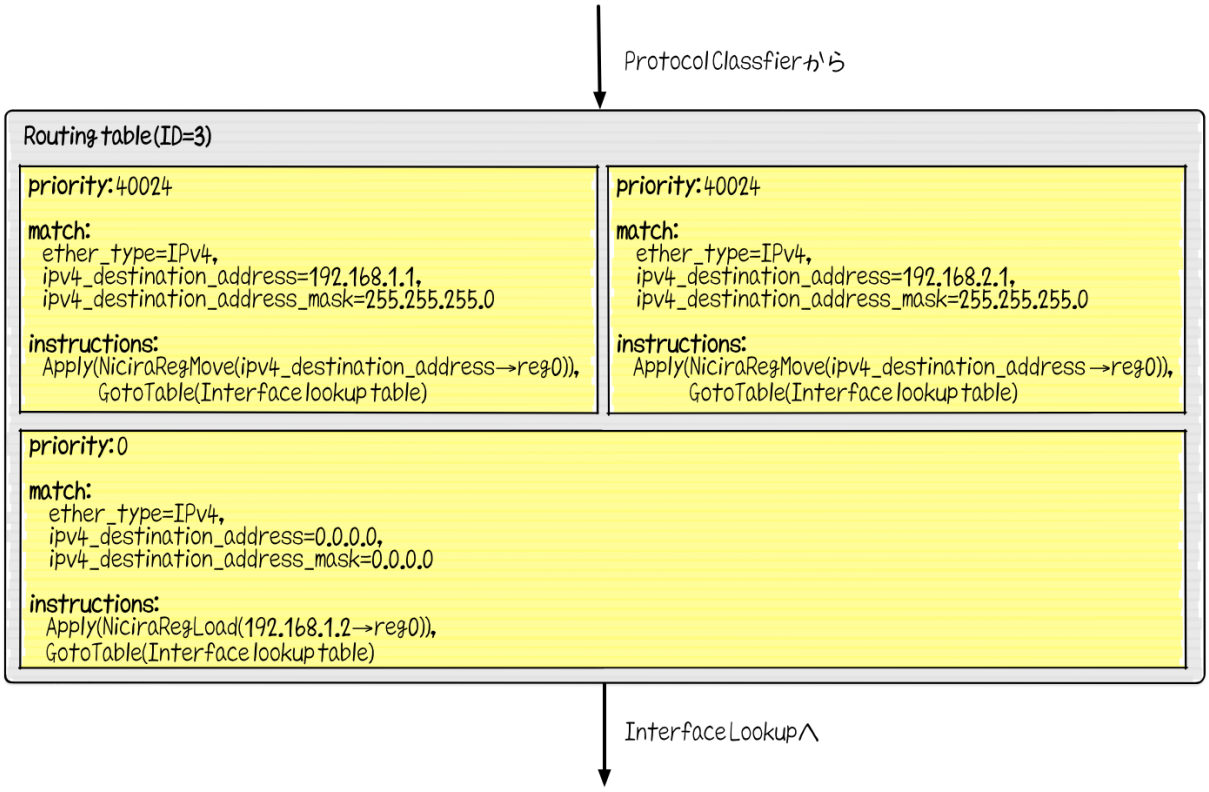


15.3. ### #########

15.1.3. ####### #####

###4 ############# #####, ######### ###### ### ### ##### ###### # 3 #######

########## ####### ##### ## ## reg0 ##################################



15.4. ### #########

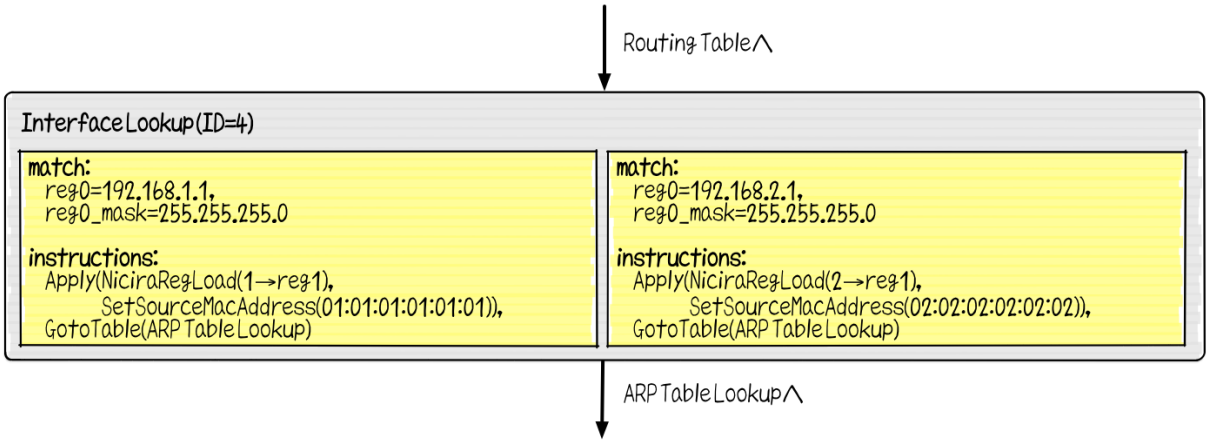
###:

> ############8### (###0####7) ###########32###############
> ####### ####### ##### ########## ## #### (###
> #) ##
> ##

> ##
> ################# ####### #### ####### ######################
> ##

15.1.4. ######### ######

######### ###### ############################ (# 14#5)######## ##### ######### reg0 ######################### reg1 #################### ### ######### ### ### ##

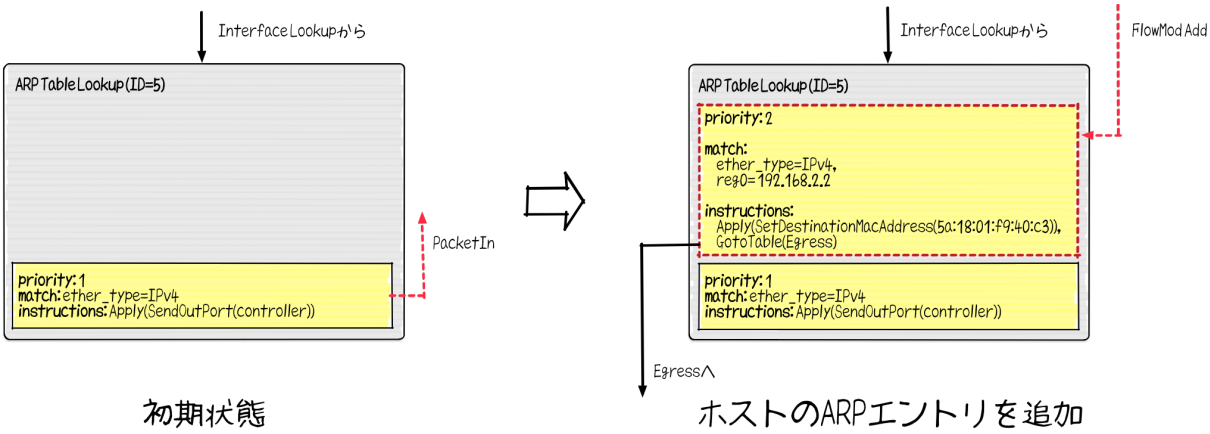


15.5. ######### ######

15.1.5. ### ##### ######

(# 14#6)# ####### (reg0) ########### ### ############ ###

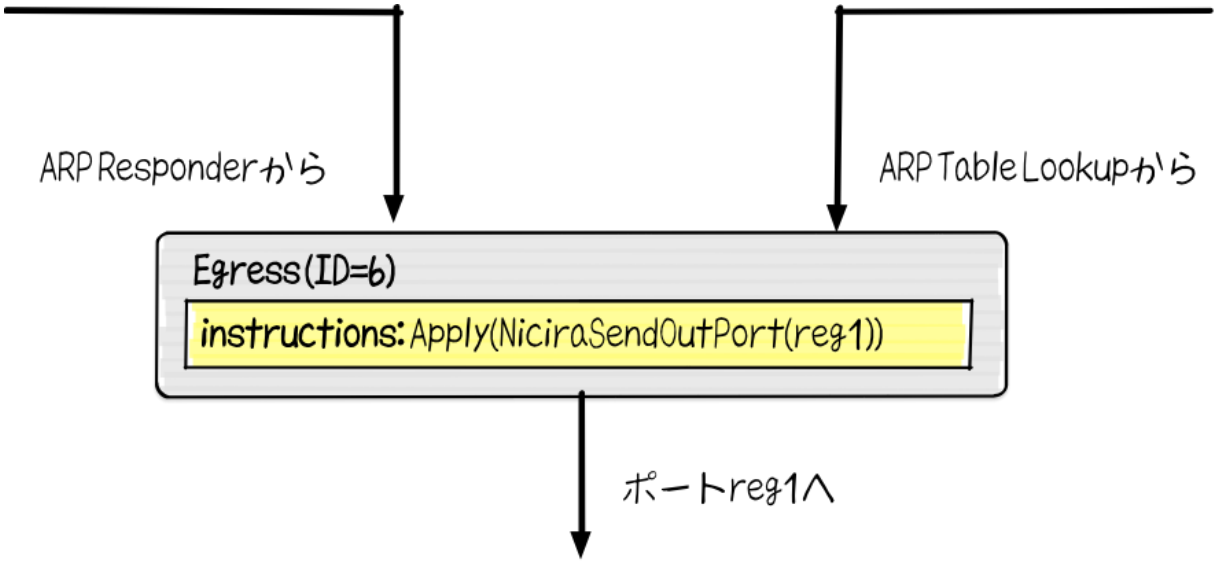
##################### 1 ######## ##### ######## ### ########################### ##############################



15.6. ### ##### ######

15.1.6. ######

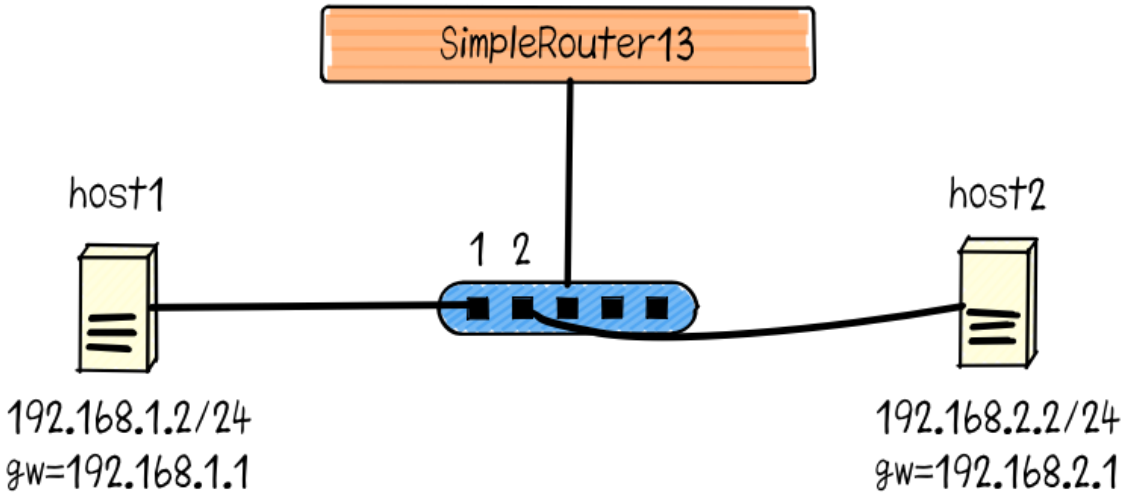
#################### ###### ######### (# 14#7)####### ######### reg1 ######## ##########



15.7. ###### ############# ###1

15.2.

######################### 14#8################



15.8.

#################################### # #####/######_###### ################ ####################

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

#######

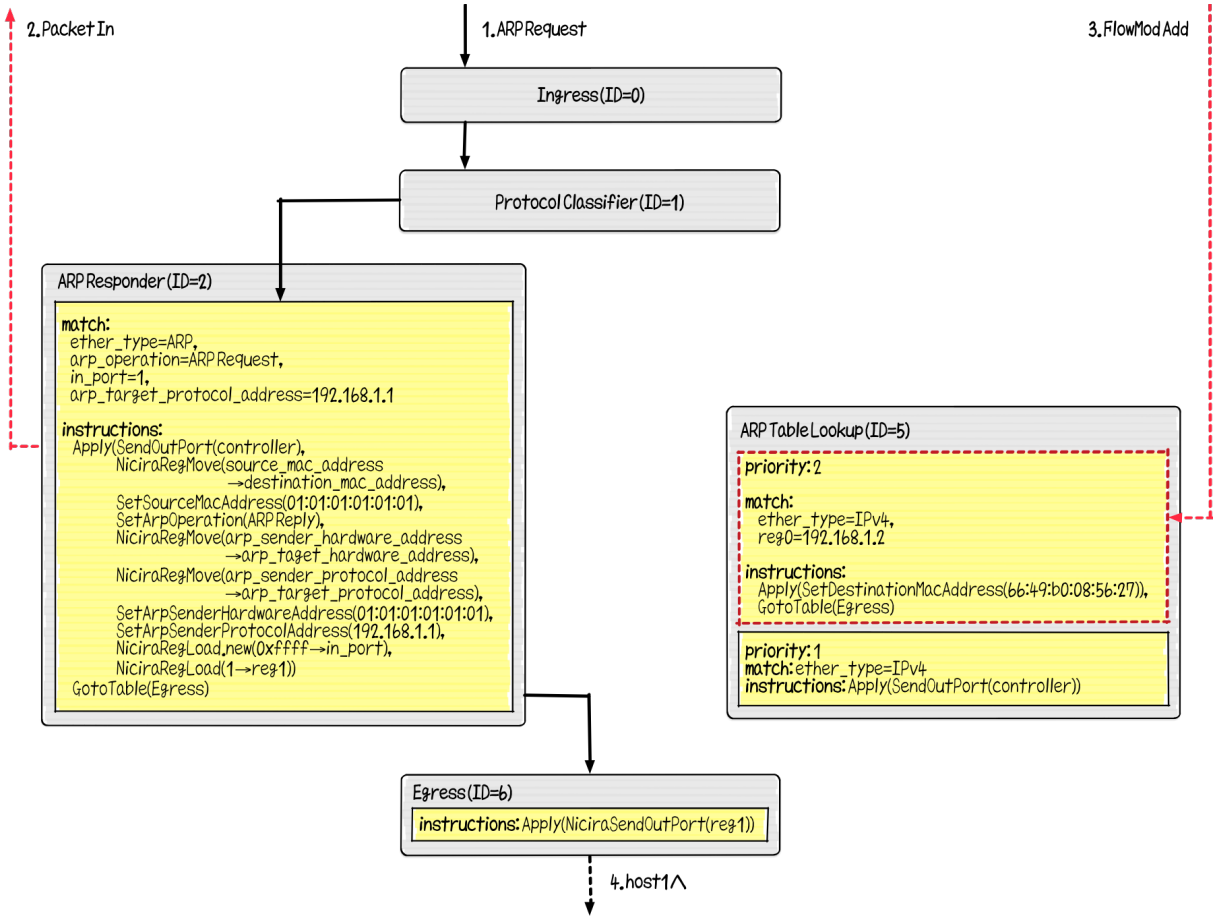
```
$ cd simple_router
$ bundle install --binstubs
```

###########

15.2.1. ##### ### #######

####1 ######## 1 ### ### ####### ################# 14#9# 2 #########:

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



15.9. ####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 # ### ##### #######

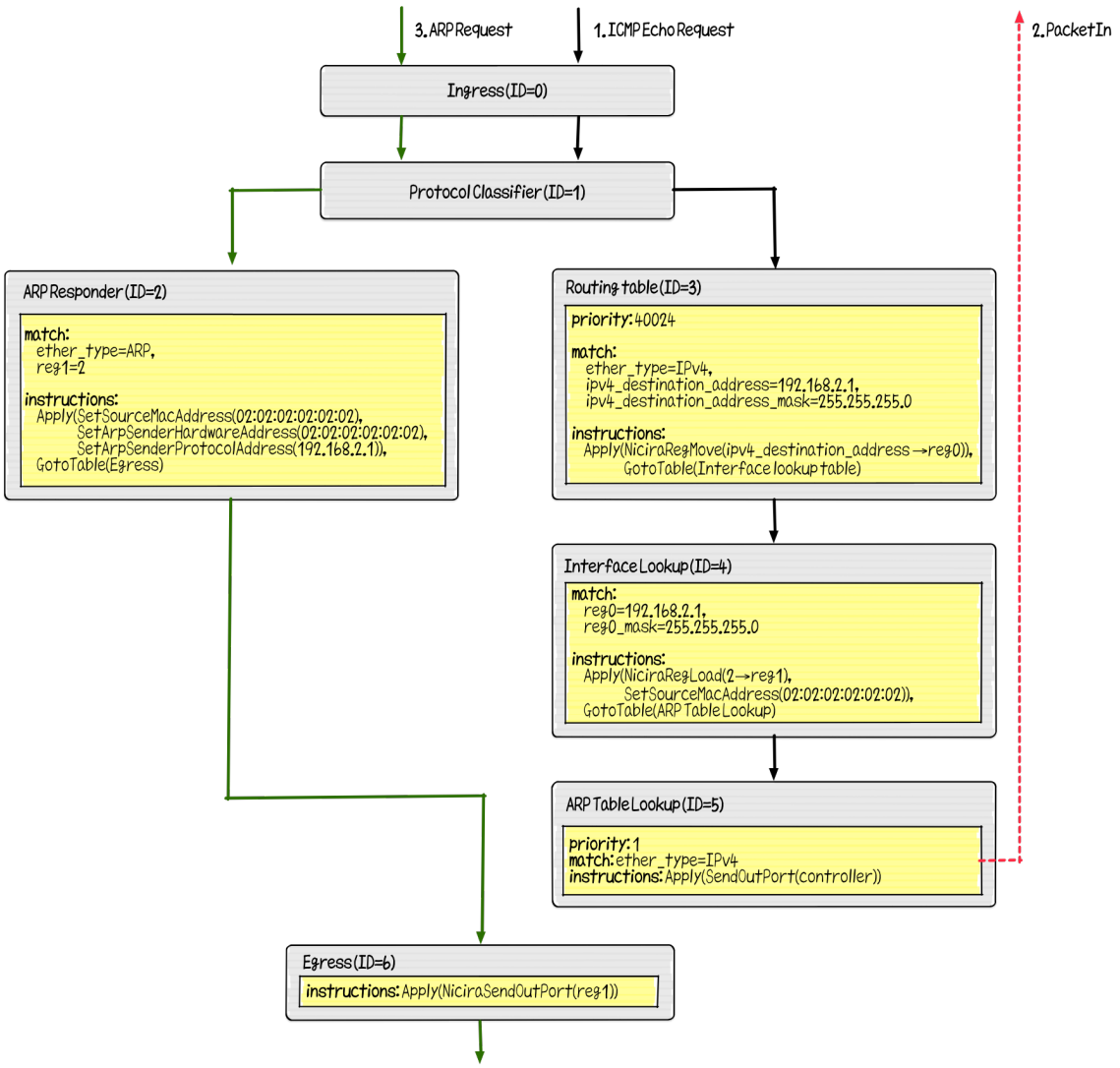
15.2.2. ####1 ## ####2 # ####

14#8 ############ host1 ## host2 # #### ######################## ####2 # #### #### #######

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

3. ####2 # ### ################## 2 ### ### ####### #####
4. ####2 #### ### ######## ### ##### #####
5. #### #### #### ####### ################ ####2 #####

################## 14#10 ############# 1 ##### #### #### ####### ######### ##### # ######## ########## ### ####### ##### ############### (# 14#10 # 1)######## ##### # ######### ###### ######################



15.10. ####1 # ####2 # #### #### ####### ######## ####2 # ### #

15.2.3.

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

[1]############ 192.168.2.2 # reg0 ################### ###### ################ ####### 2 # reg1

15.2.4. ####2 # ### #######

####2 # ### ################2 # ### ################### ####### ##################### ###### ## ### (# 14#10 # 2)#

####### ###### ## ################ ###########################2 # ### ######### ### ### ####### ######### ###### ### ### (# 14#10 # 3)######## ####### ## reg1 (## ####) # 2 ###########

############13#######_##_###4 (###/######_######13.##)

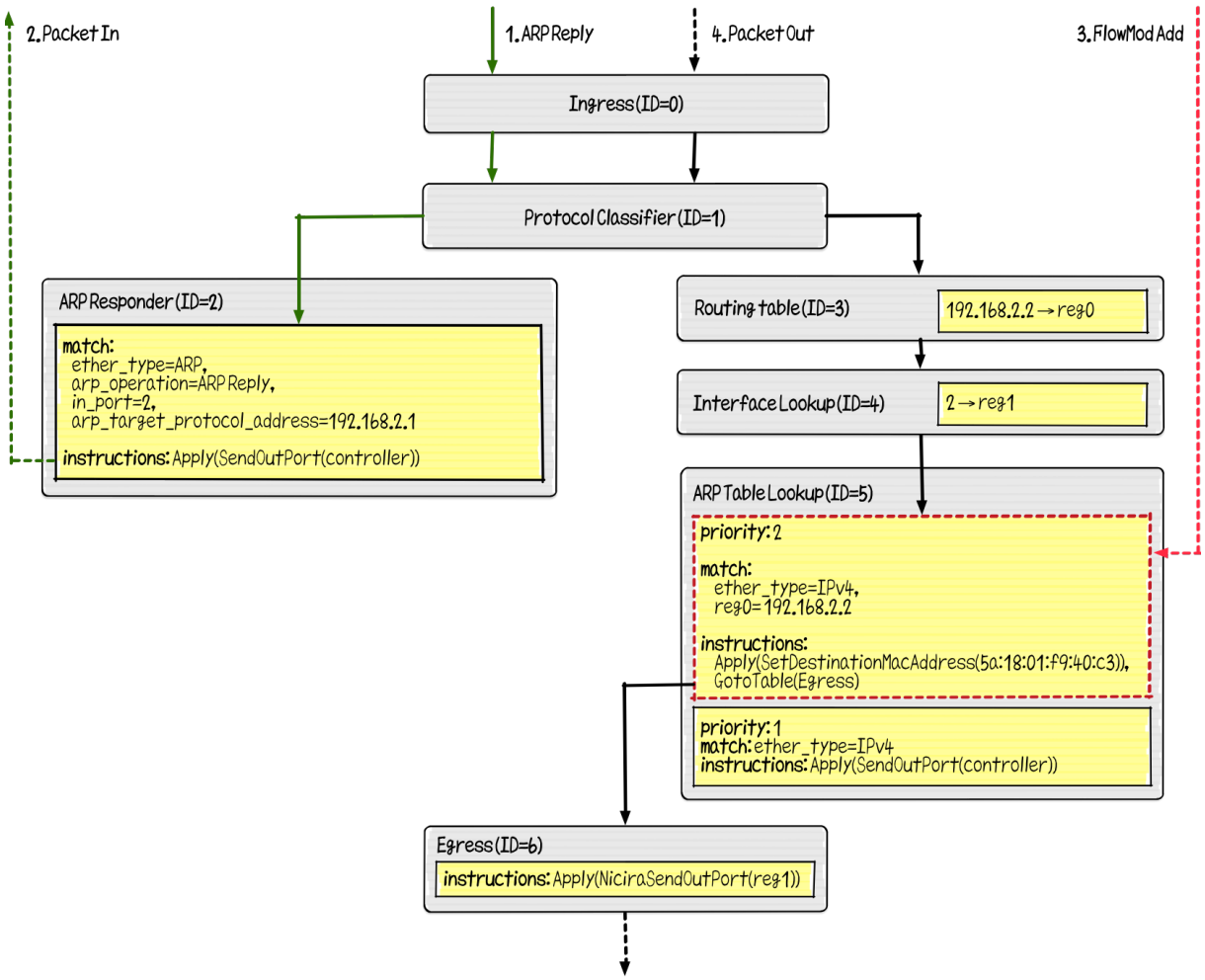
```
def packet_in_ipv4(dpid, packet_in)
  dest_ip_address = IPv4Address.new(packet_in.match.reg0.to_i)
  @unresolved_packet_queue[dest_ip_address] += [packet_in.raw_data]
  send_packet_out(
    dpid,
    raw_data: Arp::Request.new(target_protocol_address: dest_ip_address,
                               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 ########

15.2.5. ####2 ### ### #####

####2 ### ### ##### ############ ###### ## ### (# 14#11 # 1, 2)#

[1] ############################## (#### ######### ######) ## (################) ######### lib/simple_router13.rb # SimpleRouter13#add_routing_table_flow_entries ##### #########



15.11. ####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

15.3.

############ (###/######_######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=##` ######## ## ## ################ ################################### (`n_packets=##`) ########### ###############

15.4.

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

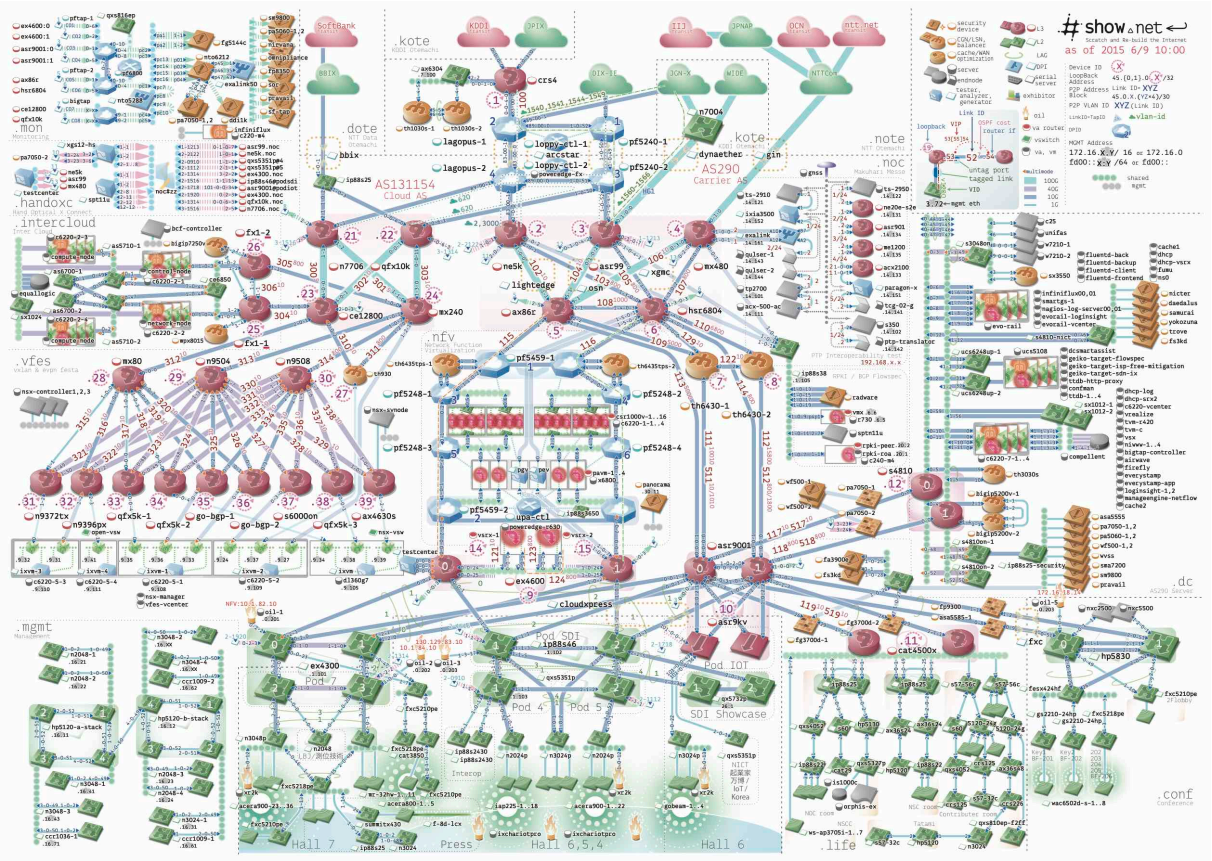
16.

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

16.1.

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

####### ########################## ##### ######## ####### ######## (# 15#1)#####
########## ##?#########
##############?###
#######################



16.1. 2015 # ####### ##### # ####### #########: ####://###.#######.##/2015/#######/######/########02.### ######### # ####### ##### 2015 ####### ### #### ###### ### #### ### #####, ###. ### ###### ########.

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

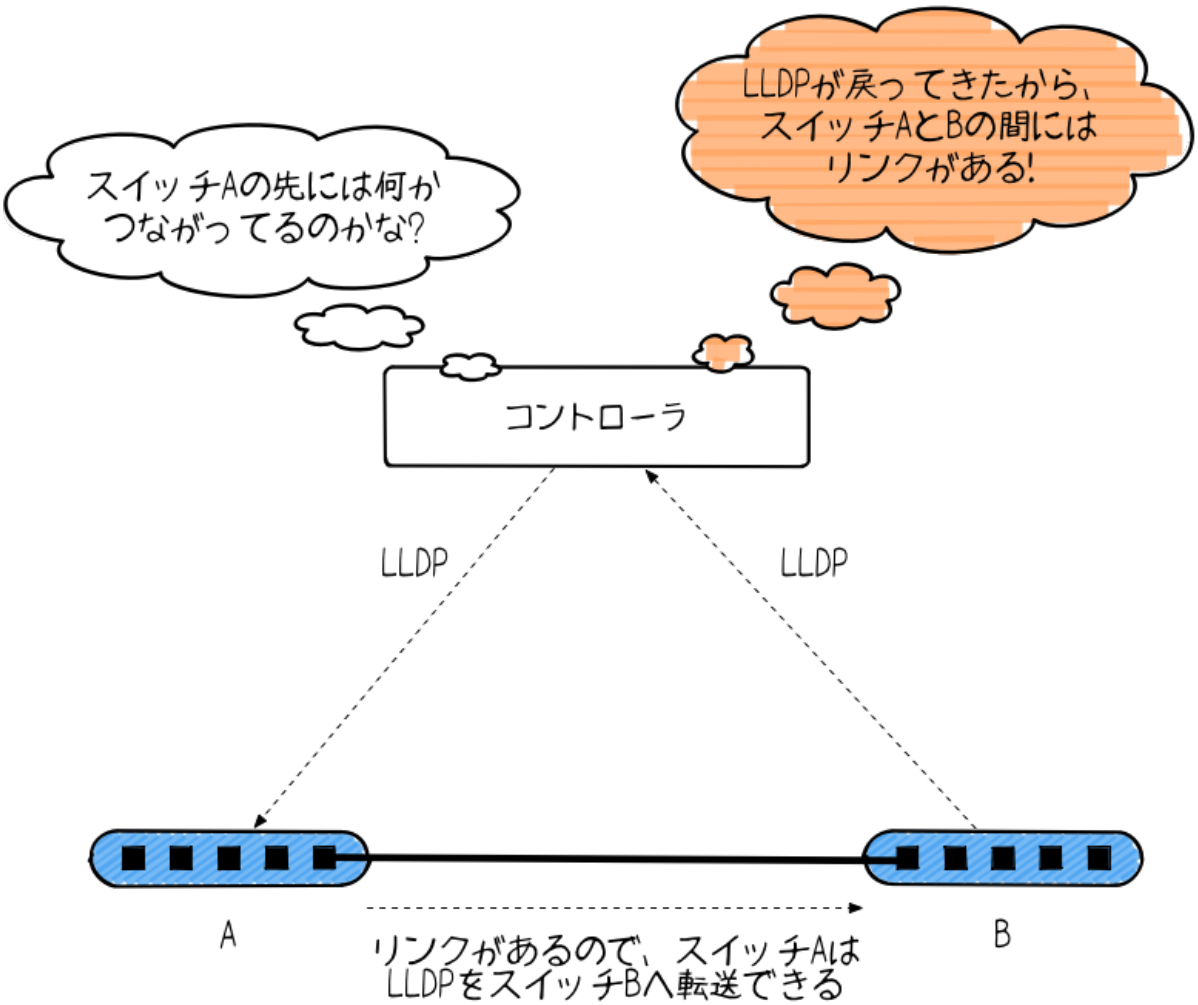
######## ##
(#####)

16.2.

###
switch_ready ##### ######## #######/#####
################################

16.2.1.

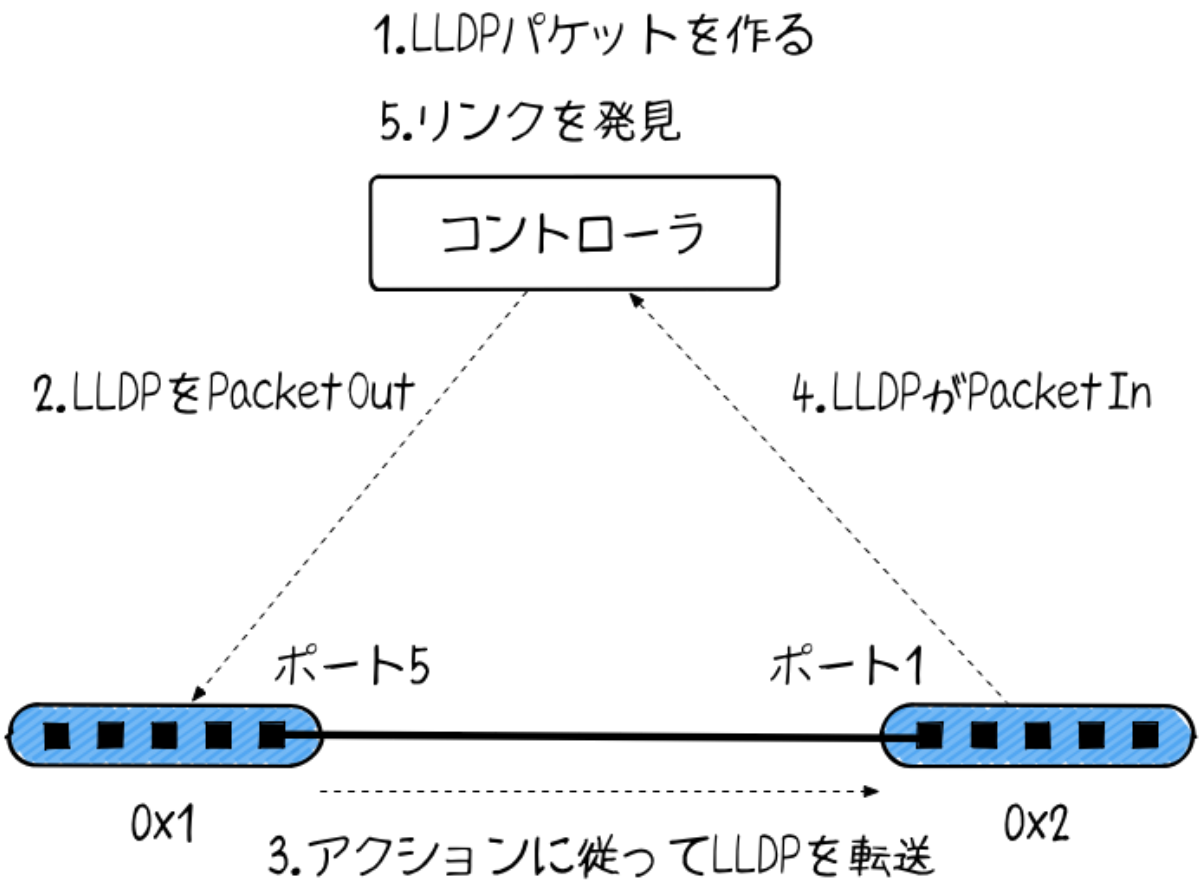
######## ######################### ##### ######### ######## (####) ###########
(# 15#2)#################################### # # #### ###################
##################################
###################
############# # # # ##
#######



16.2. ####

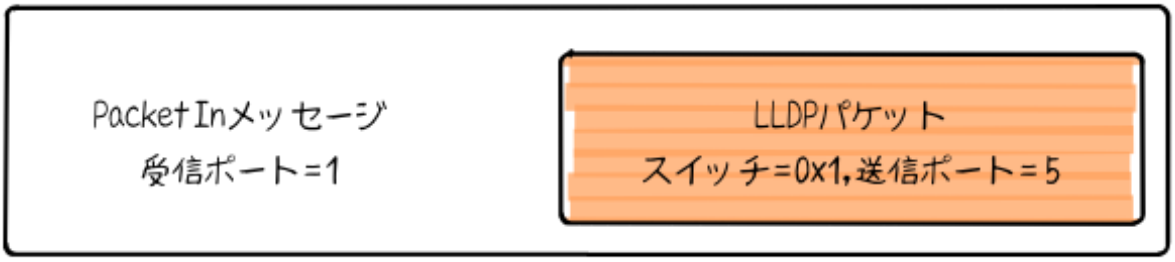
######## ## #### ######################## ################################ ######## ############################## ###### ####### ##################

15#3 ######### 0#1 #### 5 ##### 0#2 ### 1



16.3. #### ##### ########

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

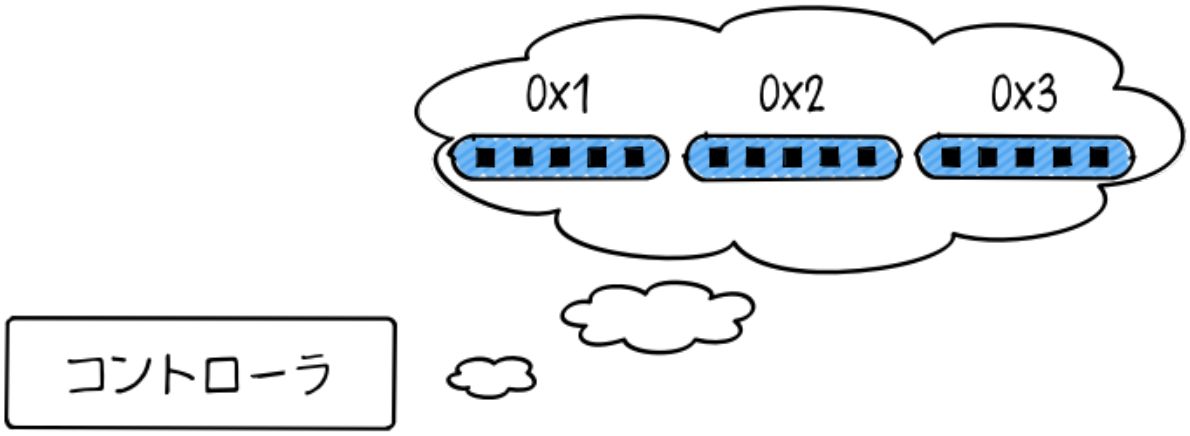


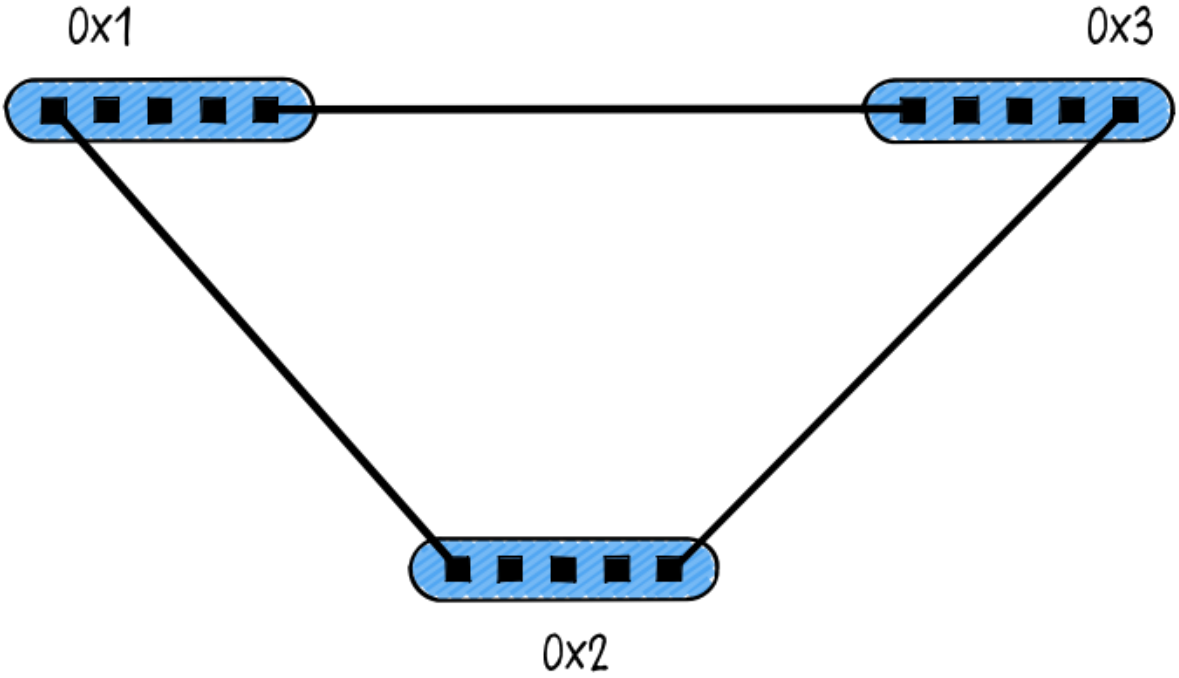
16.4. #### 0#2 ######## ###### ##

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

16.2.2.

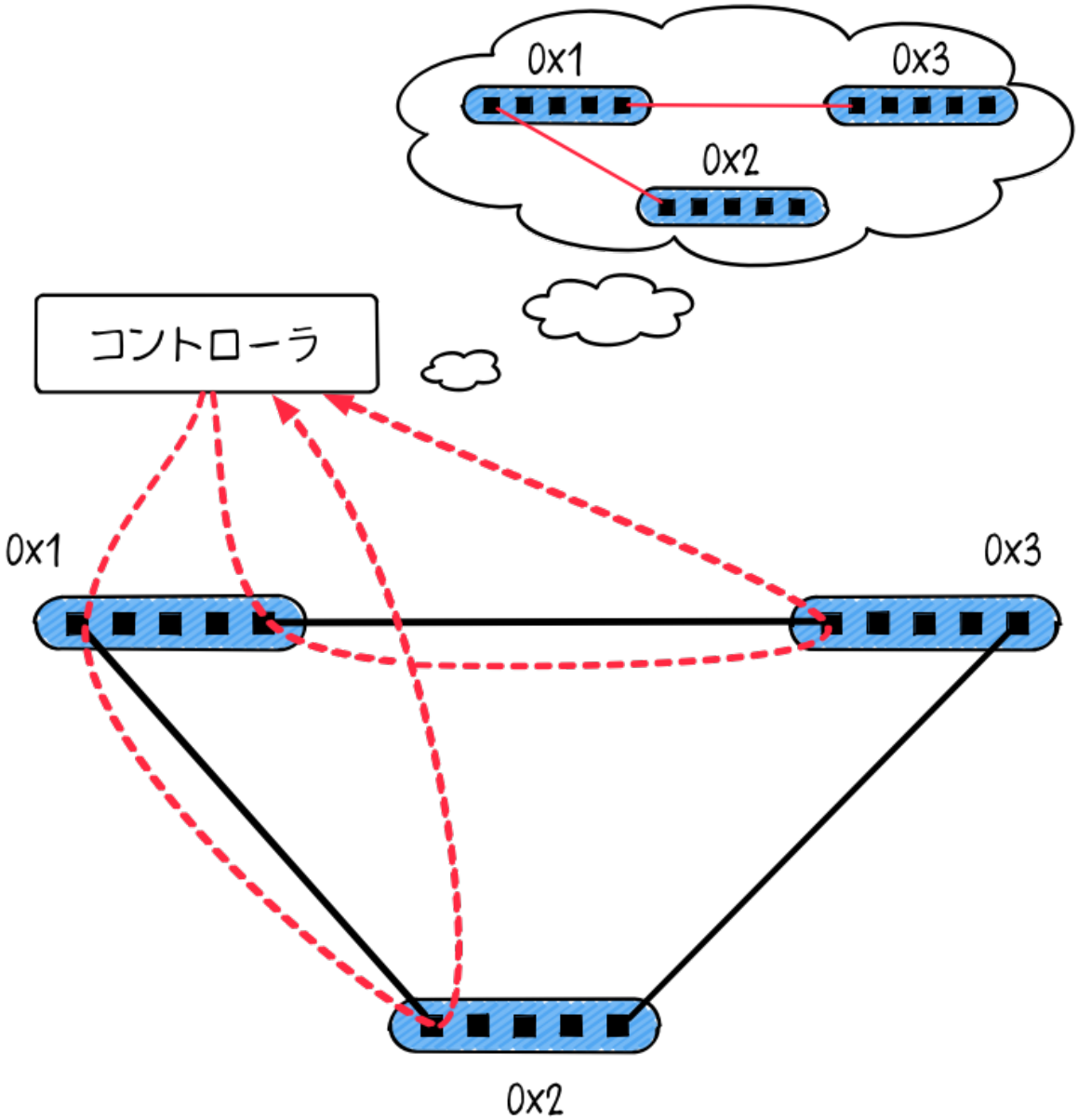
###
######### 15#5#### 3 ## ######## ##
##





16.5.

0#1 ############# ######## ####### ################ 0#1 ############### ################################ (# 15#6)########## 0#1 ###### 0#2 ####### 0#3



16.6. #### 0#1

0#2, 0#3 #########################

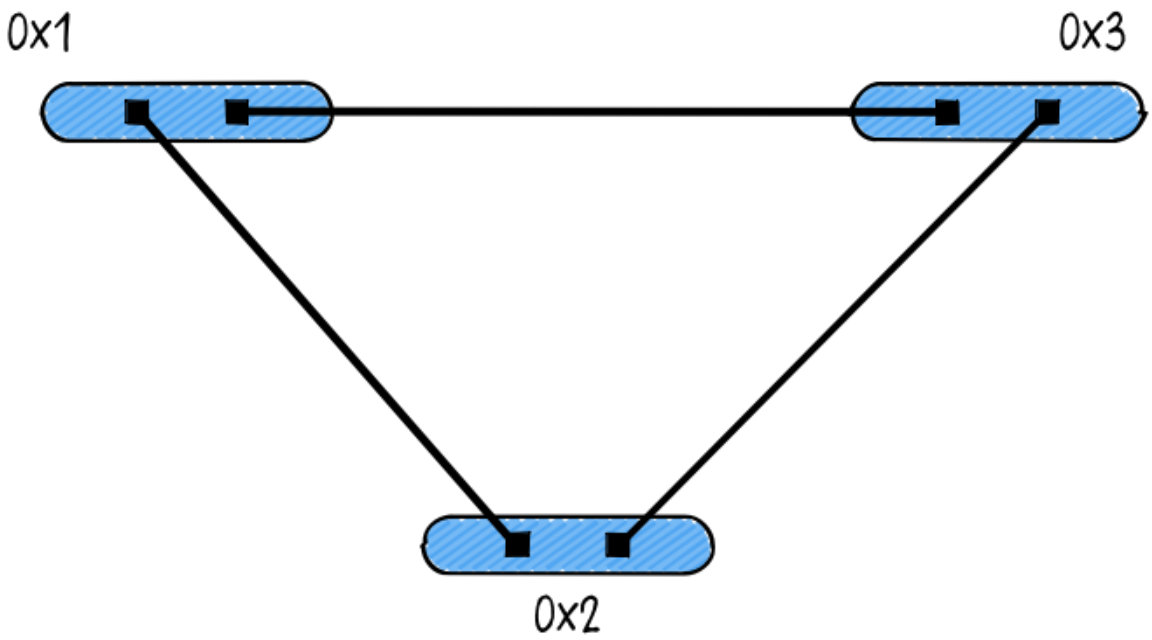
16.3.

############# ######## ### ###### # #####/ ######## ##### (#####://######.###/#####/########) ##################### git clone ########### bundle install #### ### ##############

```
$ git clone https://github.com/trema/topology.git
$ cd topology
```

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

########### `triangle.conf` ##### 3 ######################## (# 15#7)#



16.7. ########.#########

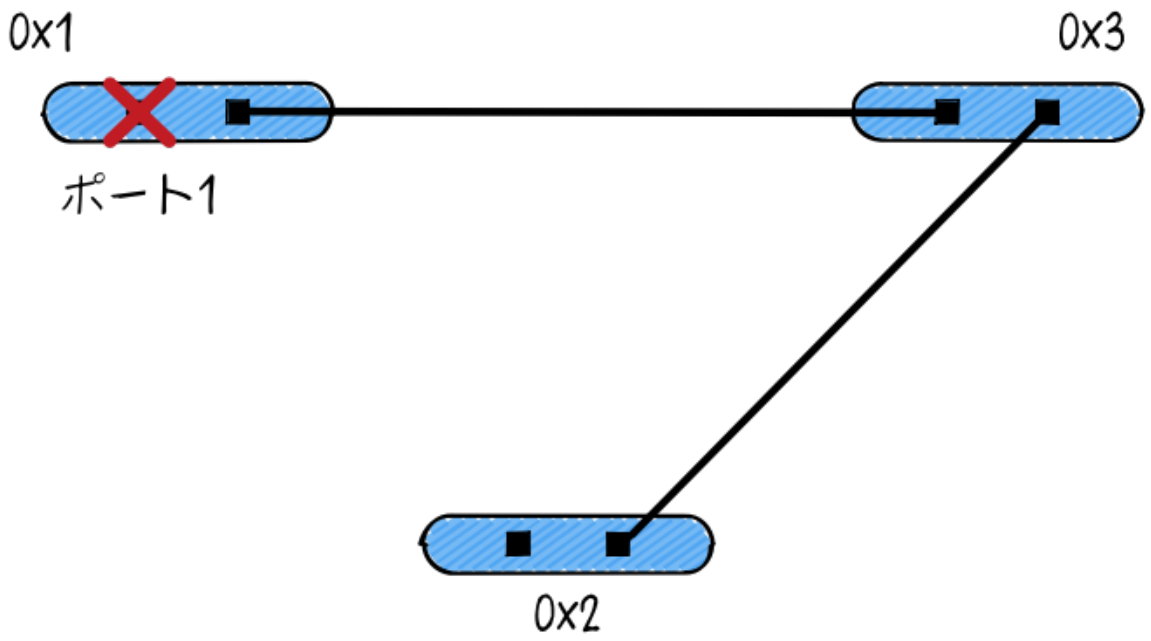
################################

```
$ ./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 ######) ########

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



16.8. #### 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
```

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

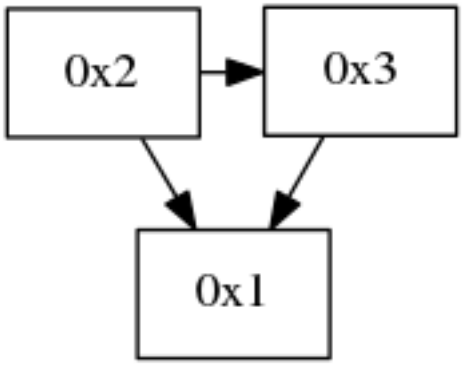
```
$ ./bin/trema port_up --switch 0x1 --port 1
```

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



16.9.

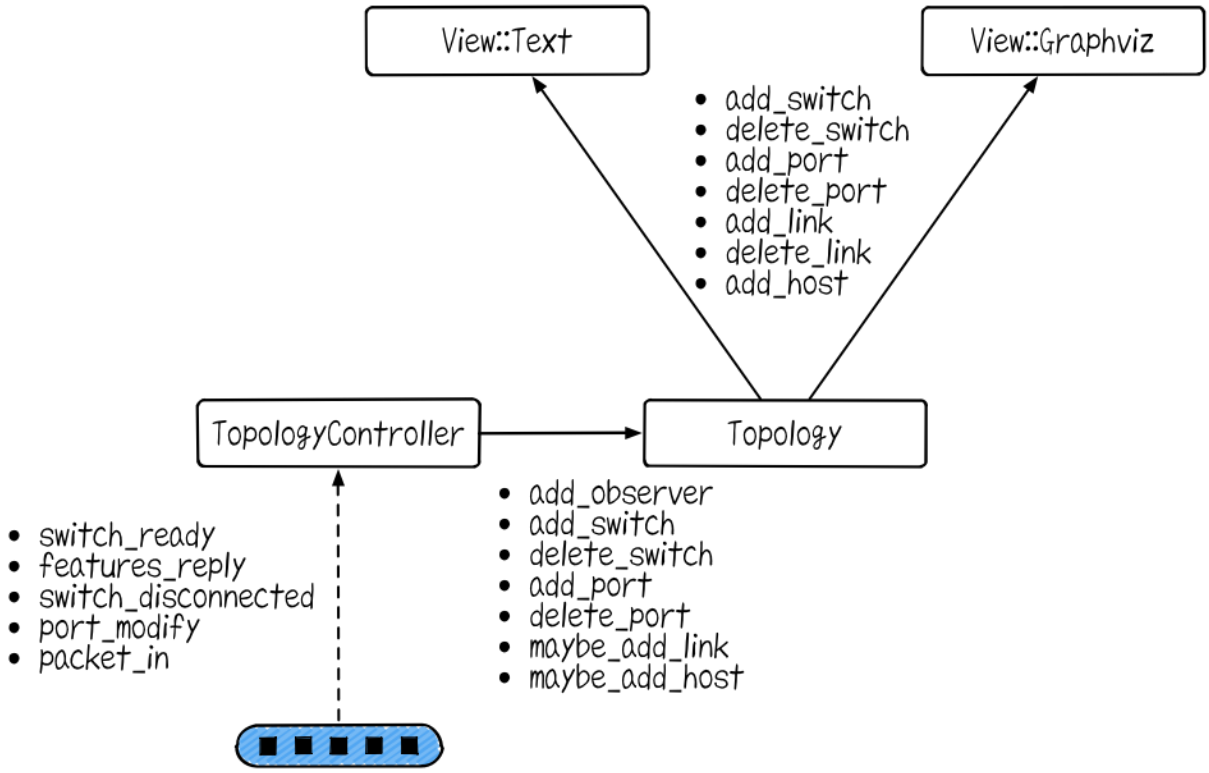
16.4.

################ 3 ########## (# 15#10)#

`TopologyController` ###
    ############################## ######## ############

`Topology` ###
    ######################## #### #########

`View::Text` , `View::Graphviz` ###
    ####################



16.10.

############# ### ### (####################) ######## TopologyController # ### ### # ######### ############# ################################### ######## Topology #### ##### ################################ View::Text # View::Graphviz ####### #### ########## ######## ########

######### ### ### #### ## ############### View::Html ##################### TopologyController # Topology ### ### ####################

16.4.1.

TopologyController ####1###### ################### 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

16.4.2. ########

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
```

16.4.3. ####

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
```

16.4.4.

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
```

16.5.

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

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

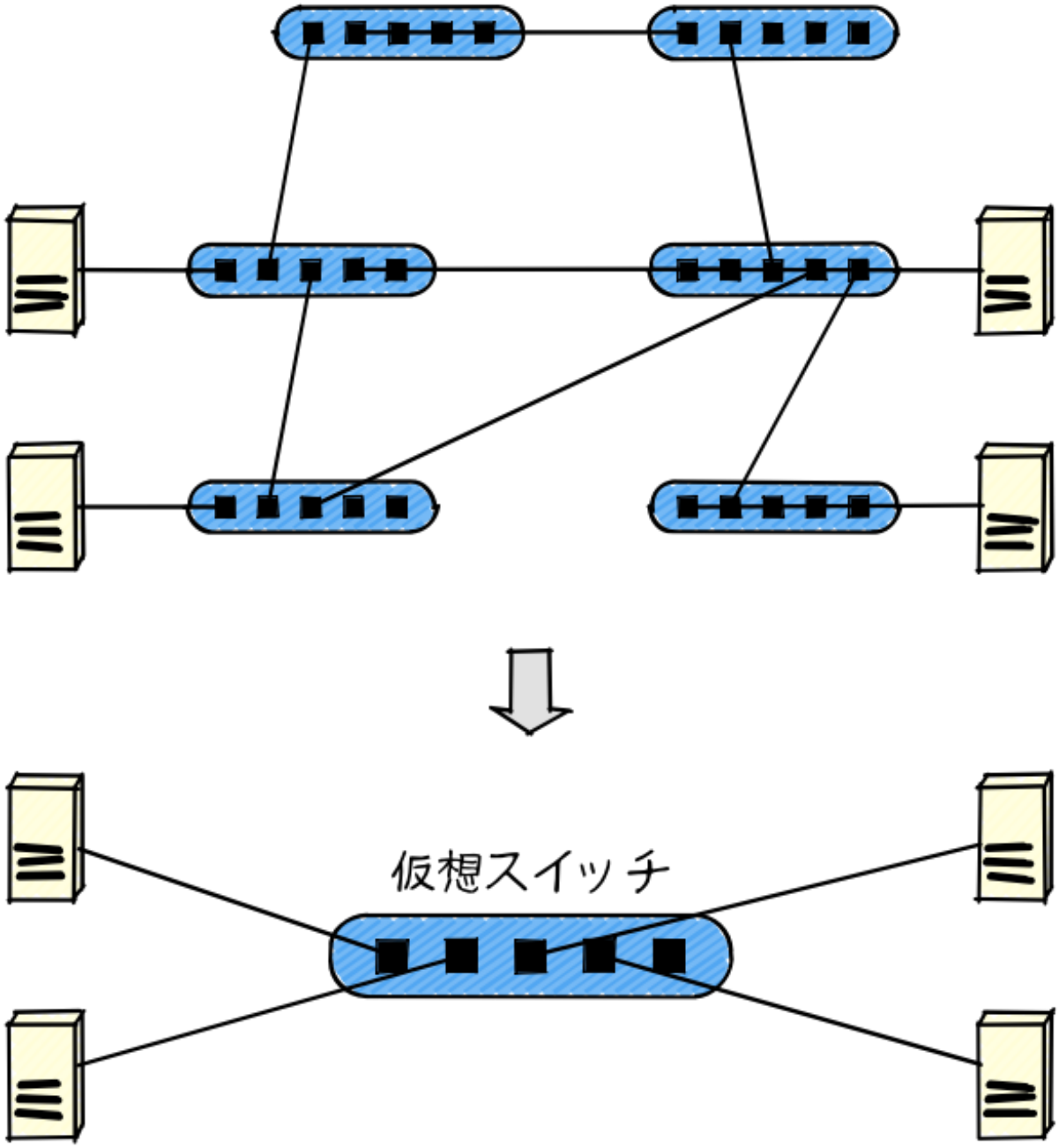
###################################### #2 ################################## ####

17.

##

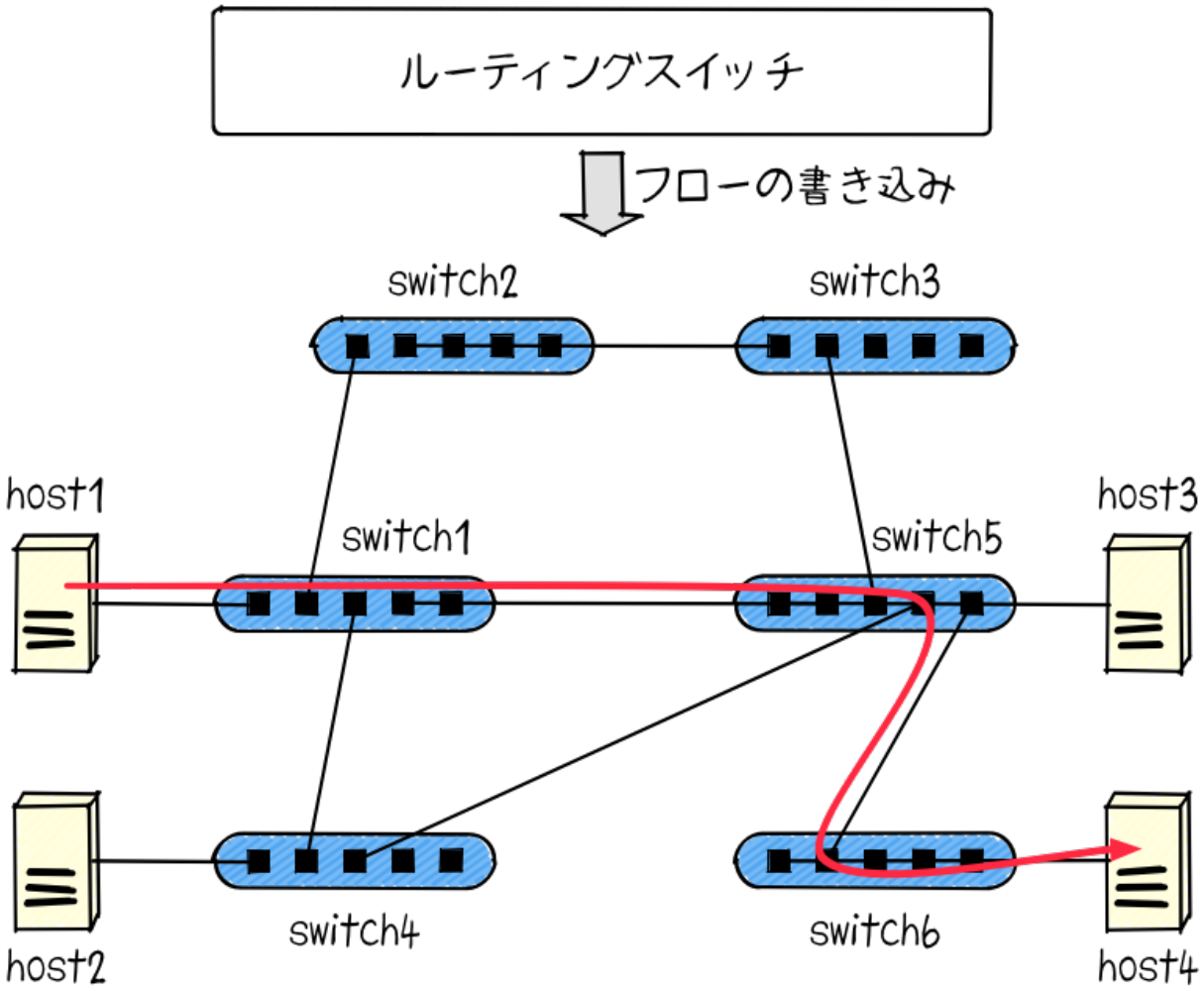
17.1.

1 ## (# 16#1)################# ########7 ##8 ## ############ ######## ######### 1 ################################ ######## # ################# 1



17.1. ################ ######## ######## 1

###

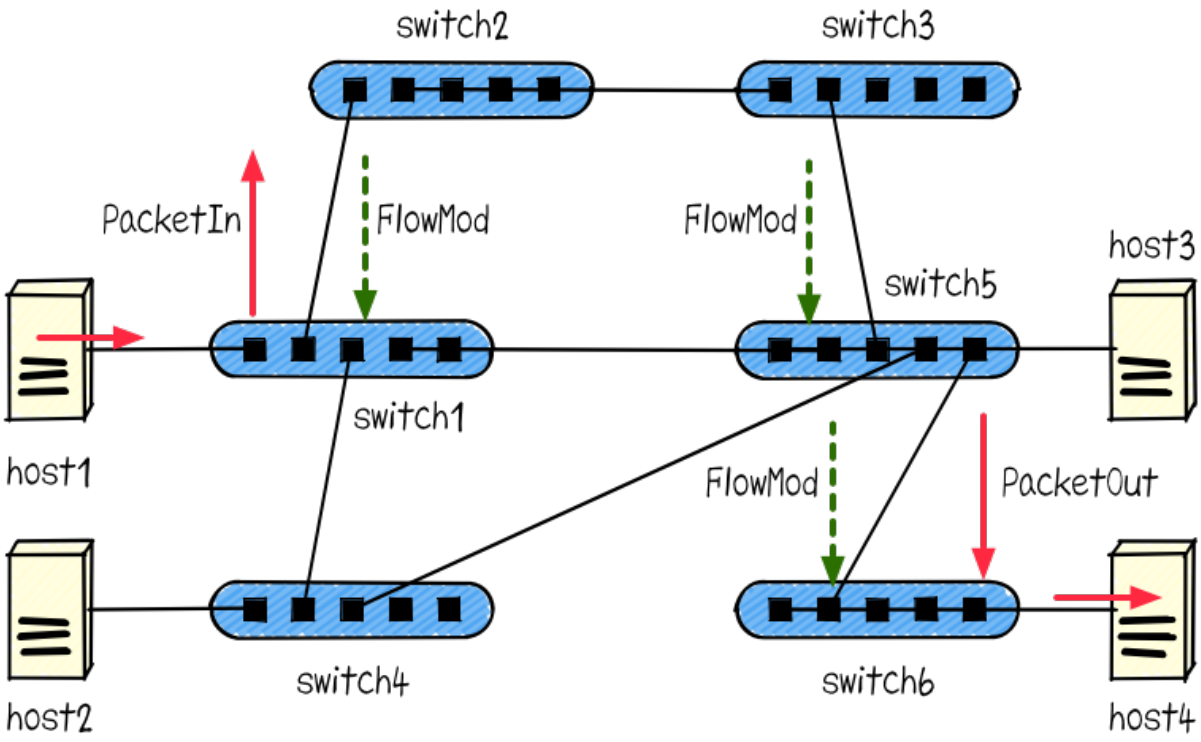


17.2.

#####16#2######## 1 ##### 4 ## 1 → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### 4 ### ###### 1, 5, 6 ############

############################## ######## ######16#3########:

1. ### 1 #### 4 ############################### ###### ## ####### 1 ###### (## ###### ## # ##_#### #### # ###)
2. ############################ (15#) ########### 4 ######### (#### 6) ###### (## # # ###) ###
3. ### # ######## # ############################ # → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### # ########
4. ## #### ### ###
5. ###### ## ################################## 6 #### # # ###### ### ###



17.3. ######################## ########

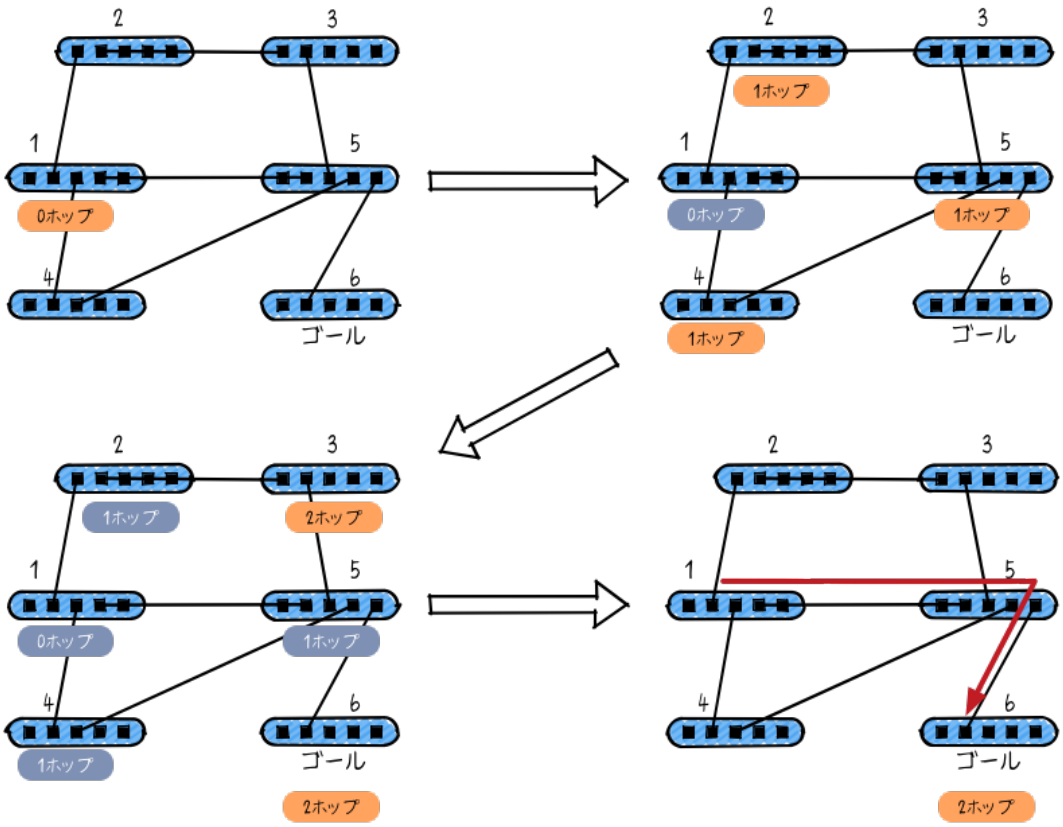
######## ######## ################### ###### ## # #### ###, ###### ### ########## ############ 3 ##############################

17.2.

1 ######

1 ########################## ############## 1 ######################## 2 ################################## ## 3 #### 4 ###……###[1]

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



17.4.

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 ####

17.3.

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

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

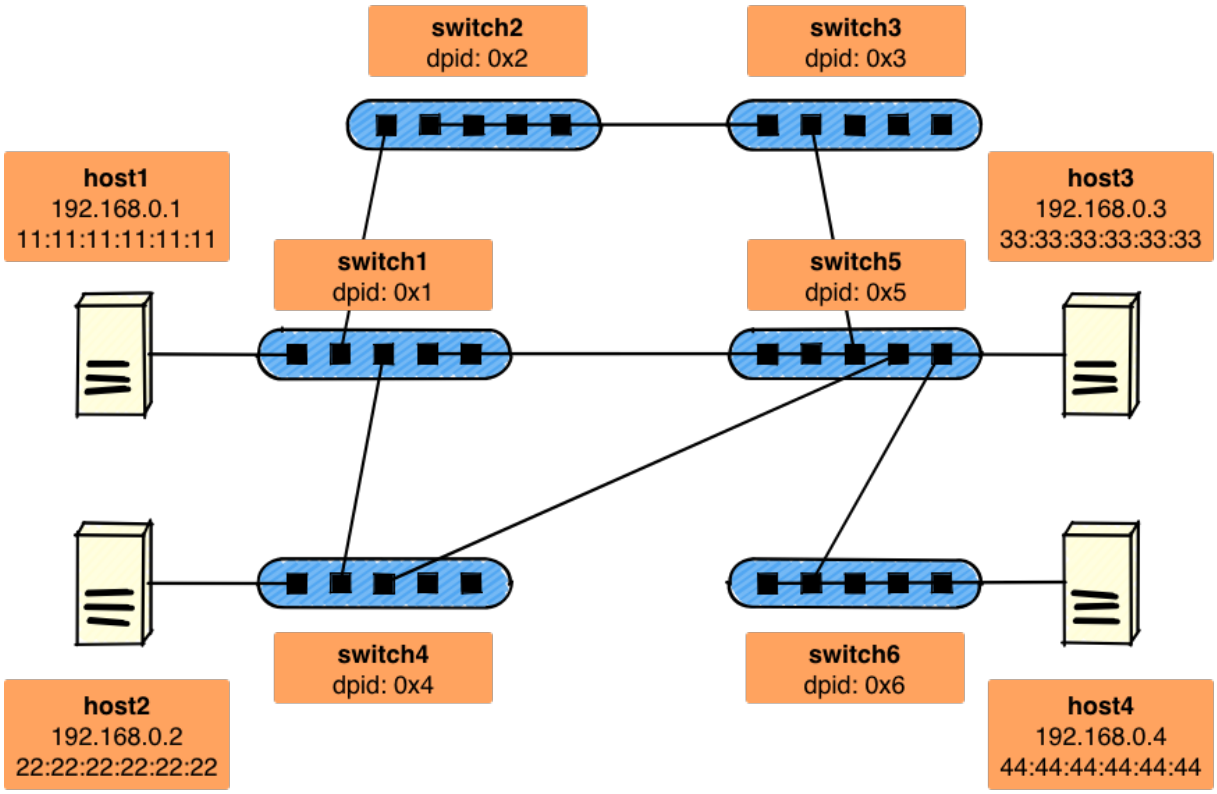
`bundle install`

```
$ cd routing_switch
$ bundle install --binstubs
```

##########

17.3.1.

############################## ####################### 16#5 #############



17.5. ### 4 ###### 6

(trema.conf)#######################
###############

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

17.3.2.

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

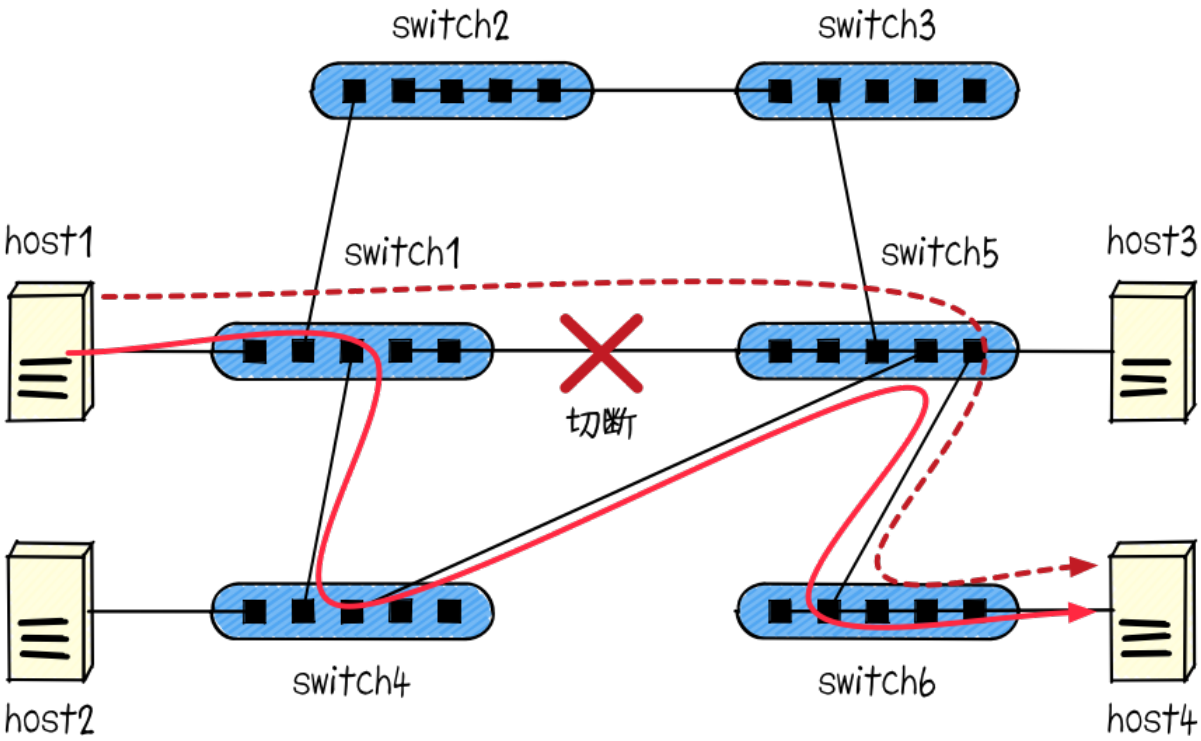
############ ######2, ######3, ######4 ################################

```
$ ./bin/trema dump_flows switch2

$ ./bin/trema dump_flows switch3
```

```
$ ./bin/trema dump_flows switch4
```

17.3.3.

16#5 ###########1 # ######5 # ##################################### (####1 ⇔ ######1 ⇔ ######5 ⇔ ######6 ⇔ ####4) ################### ####1 # ####2 ################################## (####1 → ######1 → ######4 → ######5 → ######6) ##### (# 16#6)#



17.6.

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

###

17.4.

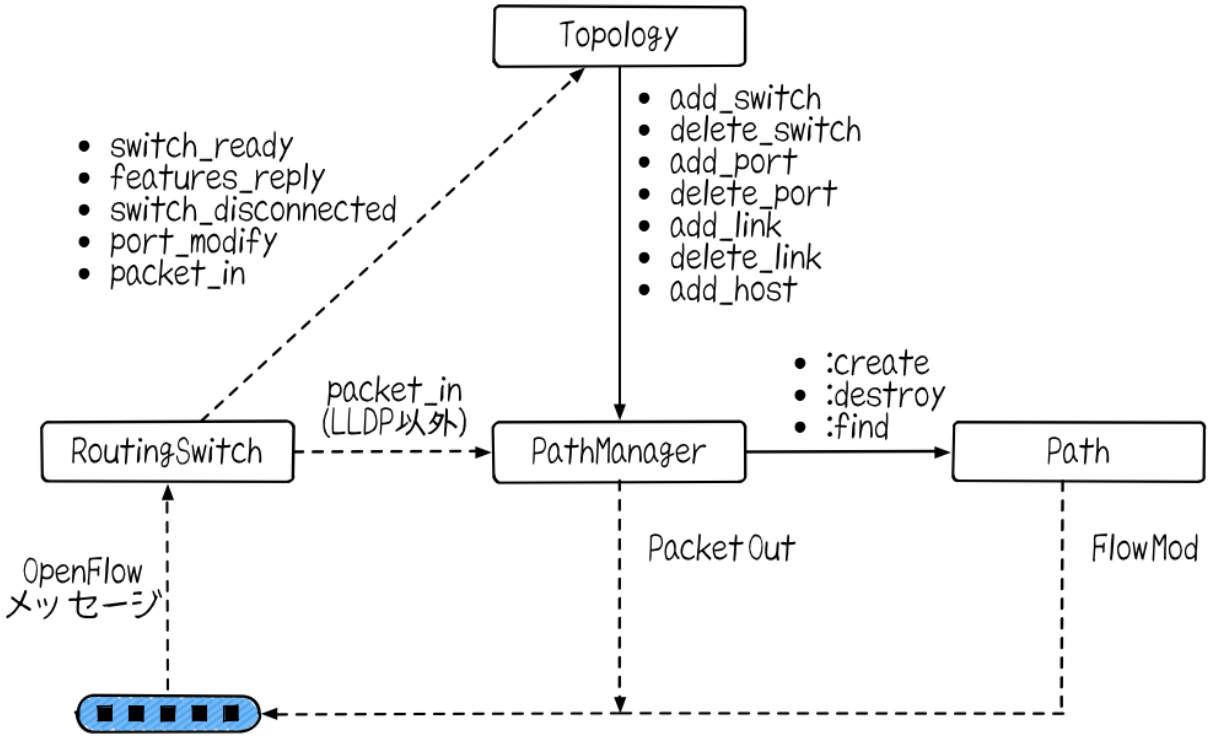
############# 4 ############### (# 16#7)#

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

```
##################, ######## ### (15 ####)
    ############    ###########    #####################    ########    ######
    ############# ########################### ########### #####
```

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

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



17.7.

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

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

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

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

```
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 ############# ######_## ##### ######## # ########### ########### ###########_## ################ ######_##

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

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

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

```
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 #######

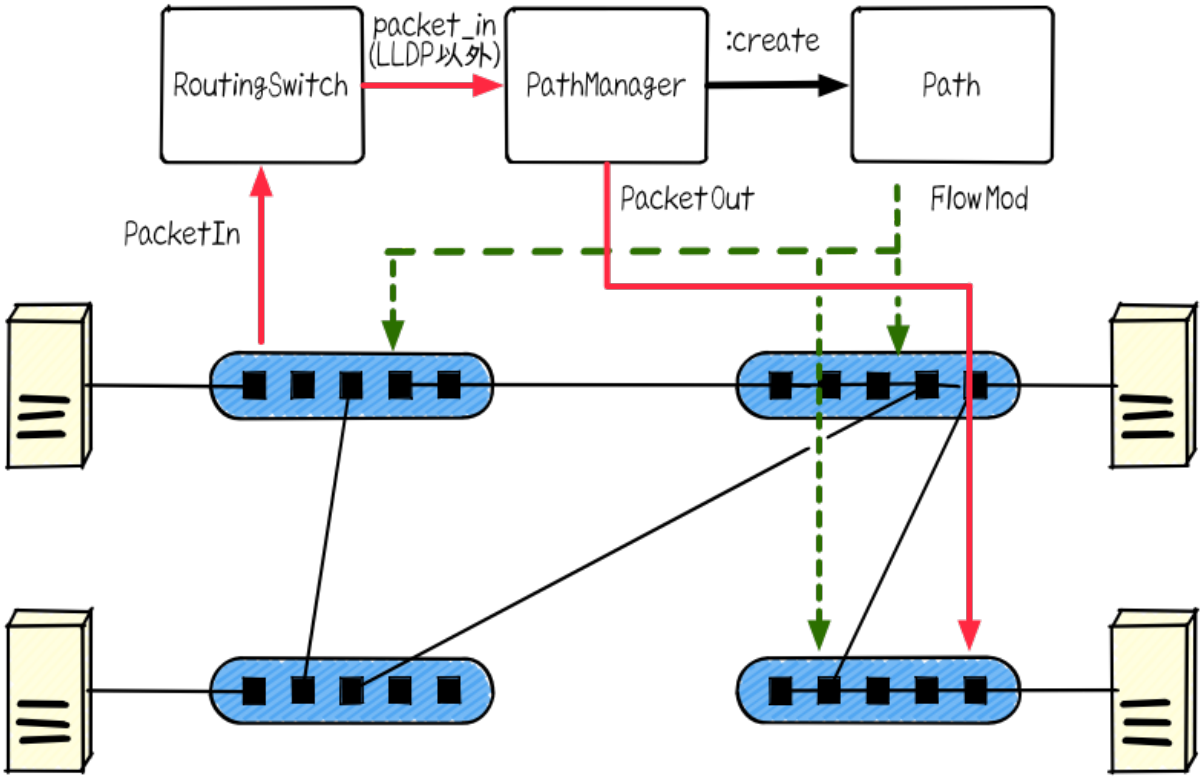
########### # packet_in ##########################

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

```
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 #####:



17.8. ###########

1. ##########→## Path.create ###
2. ## ################ (############) ############

17.4.3. #### ####### (####.##)

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
```

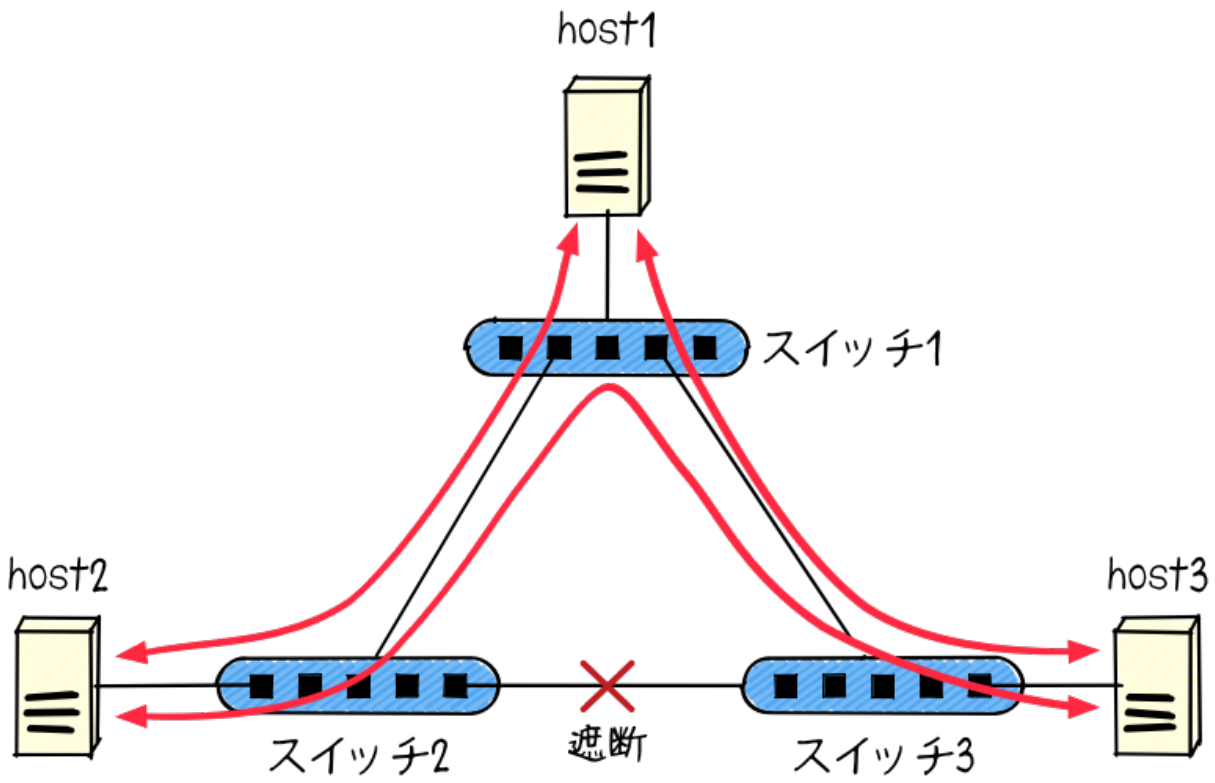
########### # Path.create ####### Path ############## save ######## save ####### ############### flow_mod_add_to_each_switch #################

17.5. ########

########################## ######## ####### 1 ############################### ################ ######## ############? ######################## ############ #############

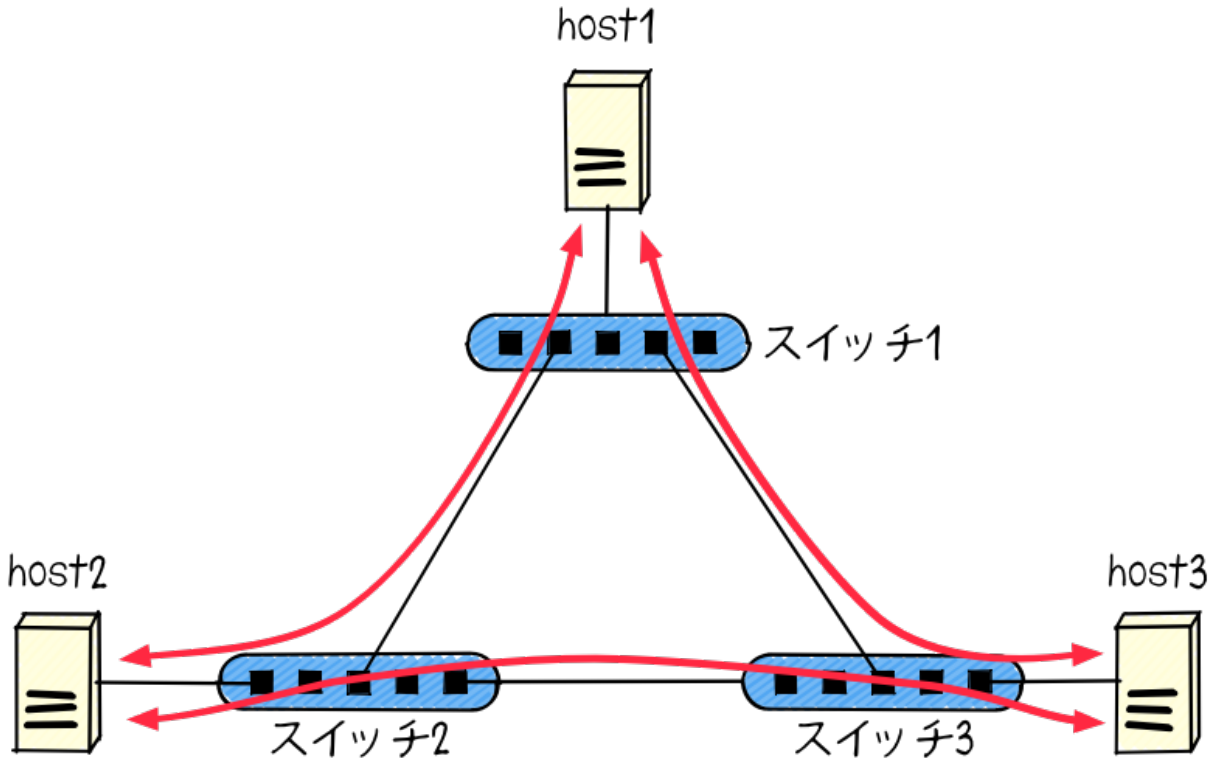
17.5.1.

16#7## ##################################2#####3################################ #2#####3################################1################################



17.9.

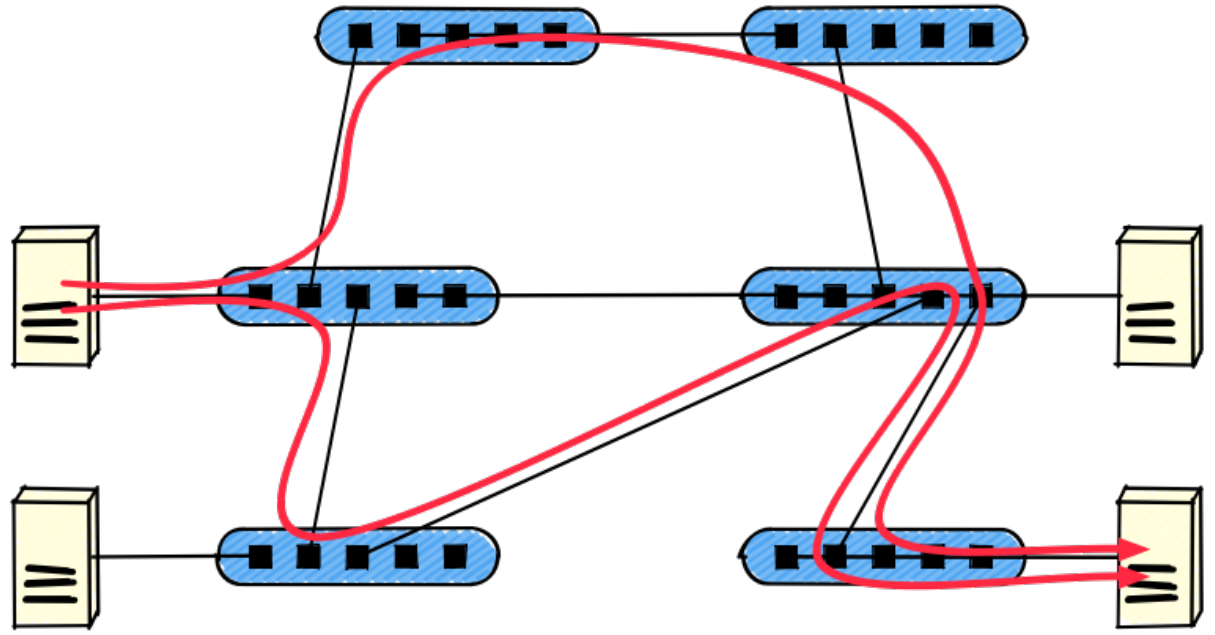
16#8##



17.10.

17.5.2.

###
########################## 16#9###
######



17.11.

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

17.6.

###

- ##
- ##
- ##

###

17.6.1.

- ########################### ############## ########### ###############
  ##
  ##################################
- ##########/## ########### ###### ######
  ######3##1##################
  ##################################

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

18.

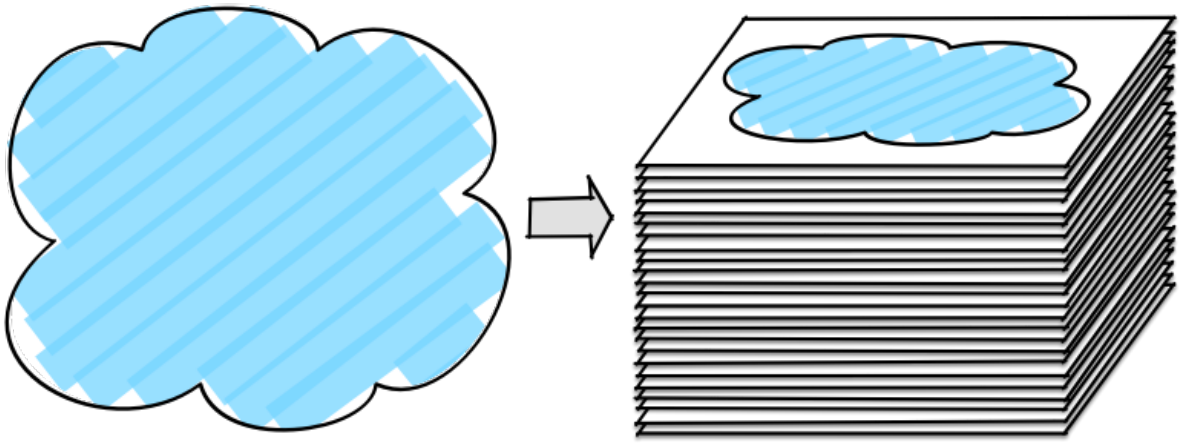
(############## ## # #######) ################ ######## #########16 ######

18.1.

(####) ###

################################## ######## ######################### ##### ##1########### ######################### ######## ######################### 2 ################# ######### + ############################

(# 17#1)#1###1##################



18.1. ############# 1

18.2.

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

######## ########### 4094 ## ###### ############################

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

############# ######## ################15#################################
######################### ######## ################################### ###
###########/#############

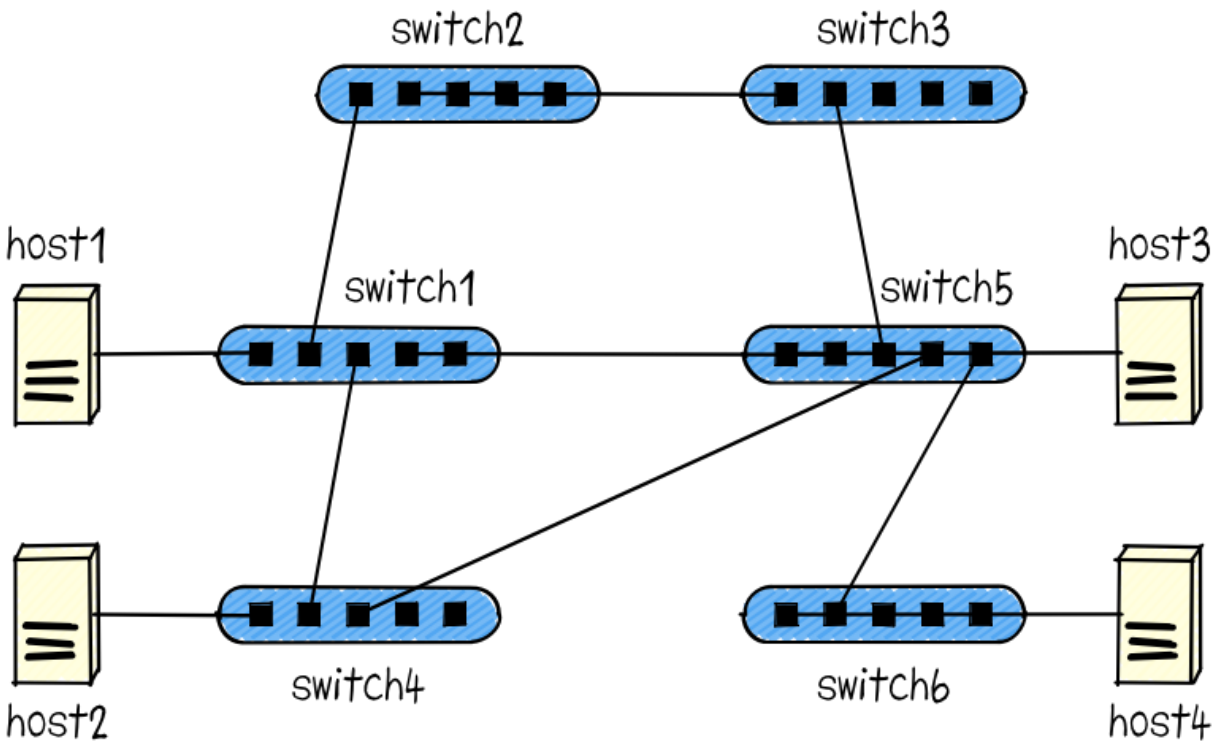
18.3.

###
###

```
$ git clone https://github.com/trema/routing_switch.git
$ cd routing_switch
$ bundle install --binstubs
```

18.3.1.

################################ ##### ##################### 17#2 #############
############################ (trema.conf) #######################



18.2.

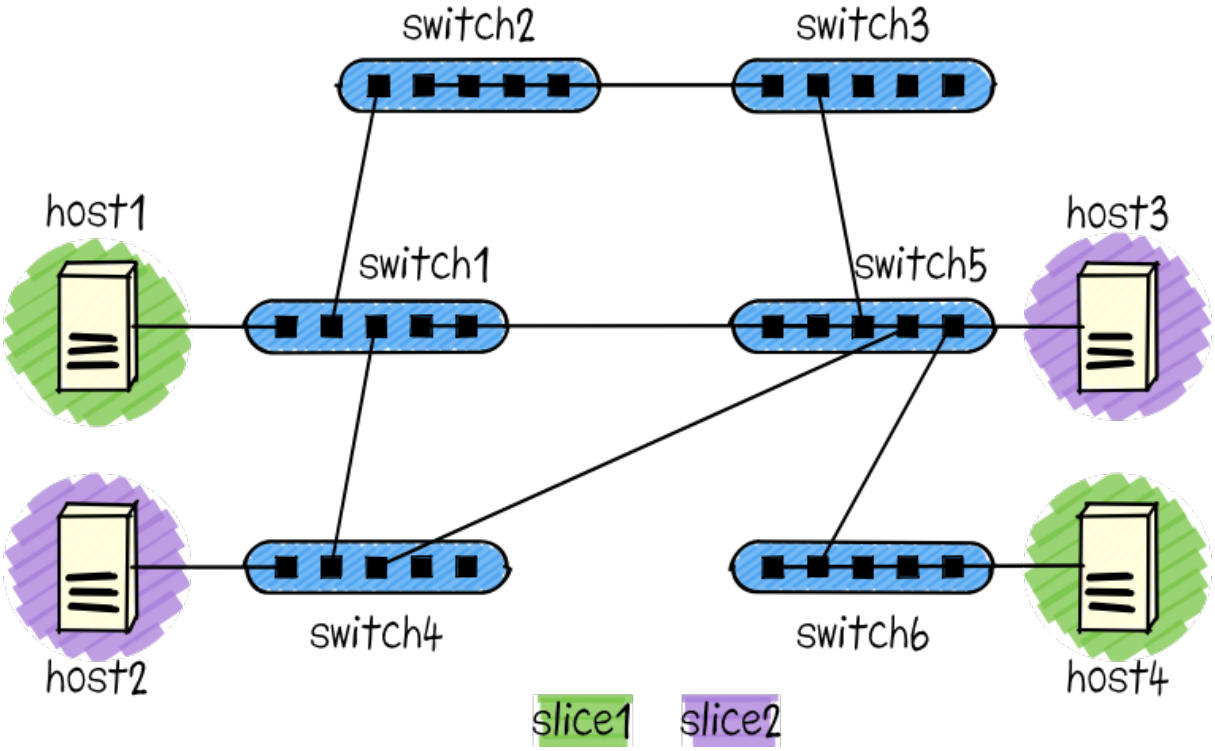
########################## trema run # -- --slicing ##############

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

##

18.3.2.

######### slice #########2 ###### slice1 # slice2 ######### 2 ################ (#17#3)#



18.3.

######## 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
```

##

18.3.3.

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

###

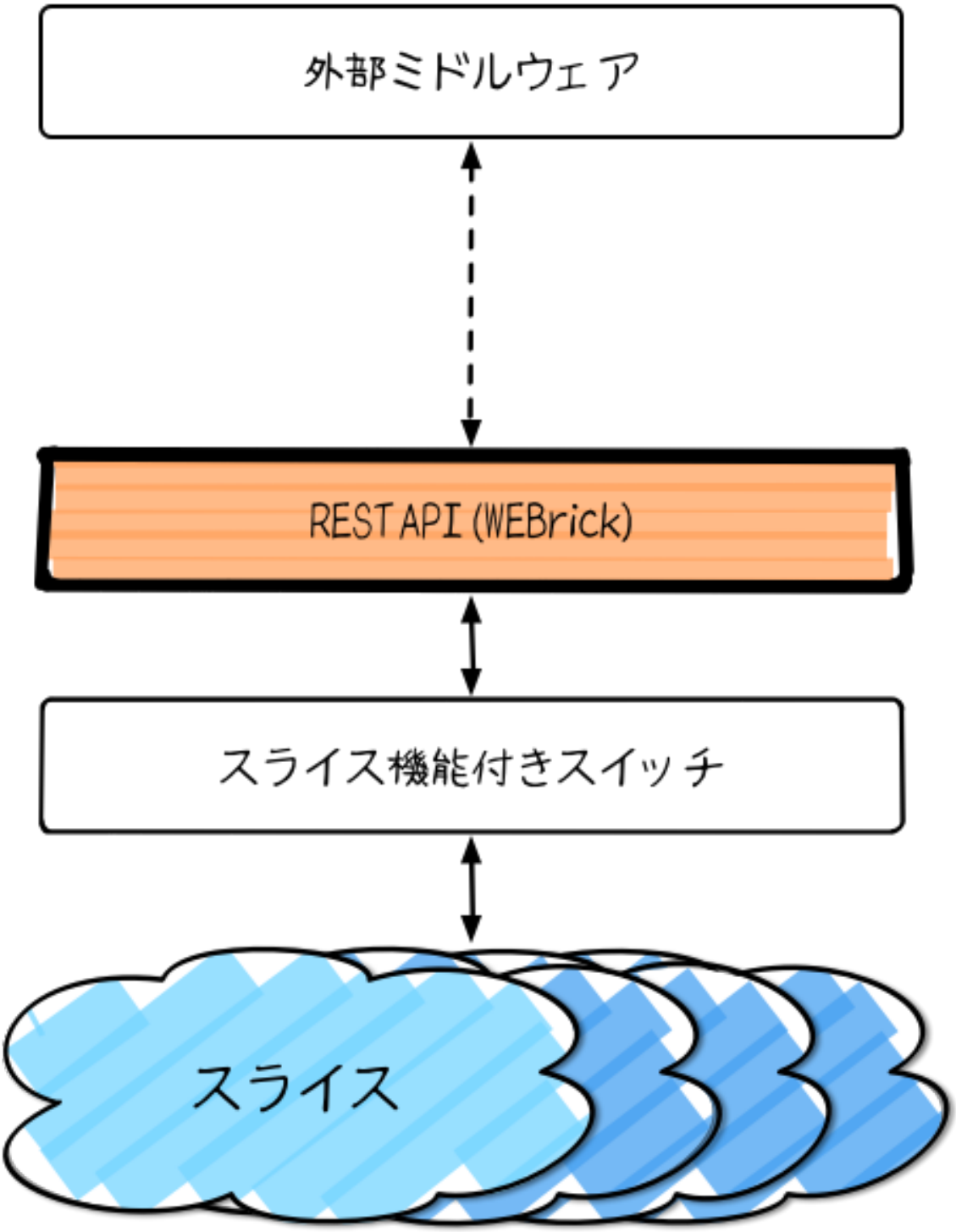
```
$ ./bin/trema reset_stats host1
$ ./bin/trema send_packet --source host1 --dest host2
$ ./bin/trema send_packet --source host2 --dest host1
$ ./bin/trema show_stats host1
Packets sent:
  192.168.0.1 -> 192.168.0.2 = 1 packet
$ ./bin/trema show_stats host2
Packets sent:
  192.168.0.2 -> 192.168.0.1 = 1 packet
```

slice1 # host1 ## slice2 # host2 ####################1 ######### 2 ########

18.4. #### ###

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

############# #### ### # #### # #### ######## ####### ###### ##17#4)######## #### ######################### #### ############ ################################ ########################### #### ### ##########



18.4. ############# #### ###

rackup ##### #######

```
$ ./bin/trema run ./lib/routing_switch.rb -c trema.conf -d -- --slicing
$ ./bin/rackup
```

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

18.4.1. #### ###

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

```
{"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

18.4.2.

`/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

18.4.3.

############################ /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"}]
```

18.5. #### ###

(# 17#1)####### #### ########### #####://#########.###/#####/##############/####/######## ############################

18.1. # 17#1: #### ###

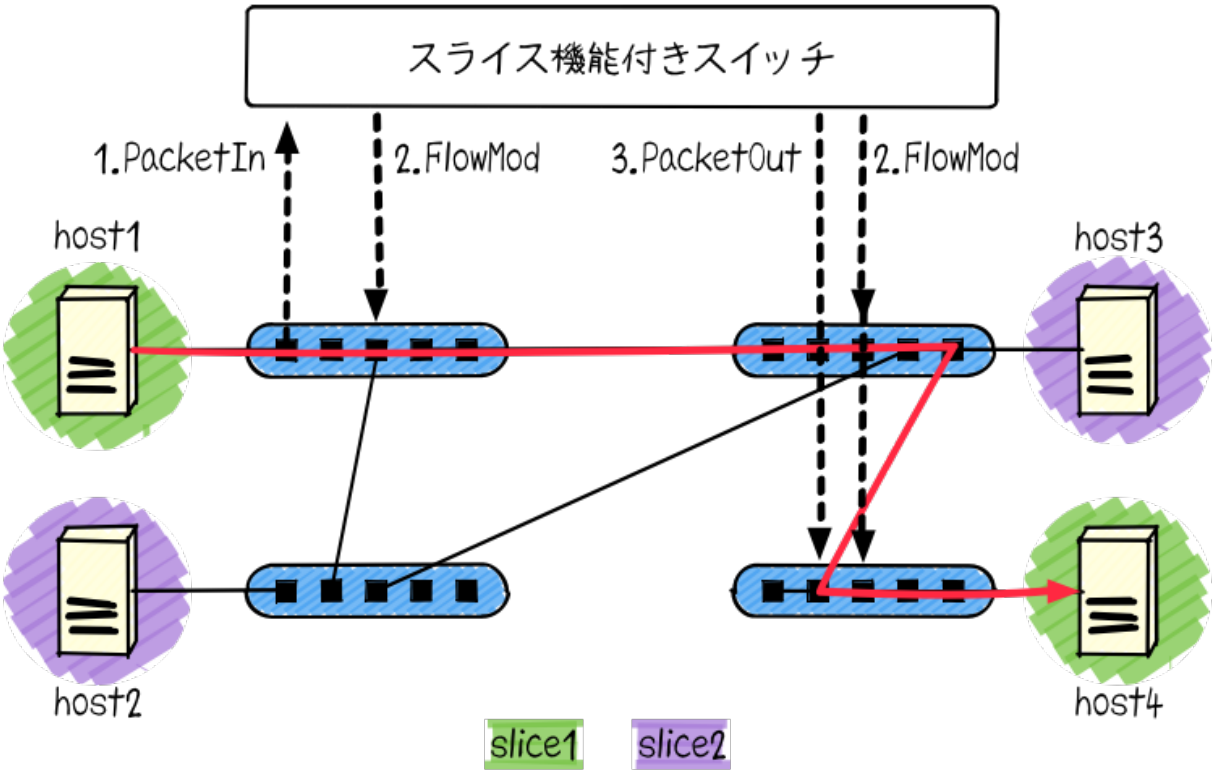
##	####	###
#######	####	/slices
#######	######	/slices/:slice_id
#######	###	/slices
#########	###	/slices/:slice_id
######	####	/slices/:slice_id/ports
######	######	/slices/:slice_id/ports/:port_id
######	###	/slices/:slice_id/ports
########	###	/slices/:slice_id/ports/:port_id

[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

18.6.

##########15###
##########################17#5##



18.5.

1. ### 1 #### 4 ################################ ###### ## ####### 1 ###### (## ###### ## # ##_#### #### # ###)
2. ############################## (14#) ########### 4 ######### (#### 6) ###### (## # # ###) ###

3. ### # #### # ##
4. ### # ######## # ############################ # → #### 1 → #### 5 → #### 6 → ### # ########
5. ### #### ### ###
6. ###### ## ################################### 6 # ###### ### (### #) ###

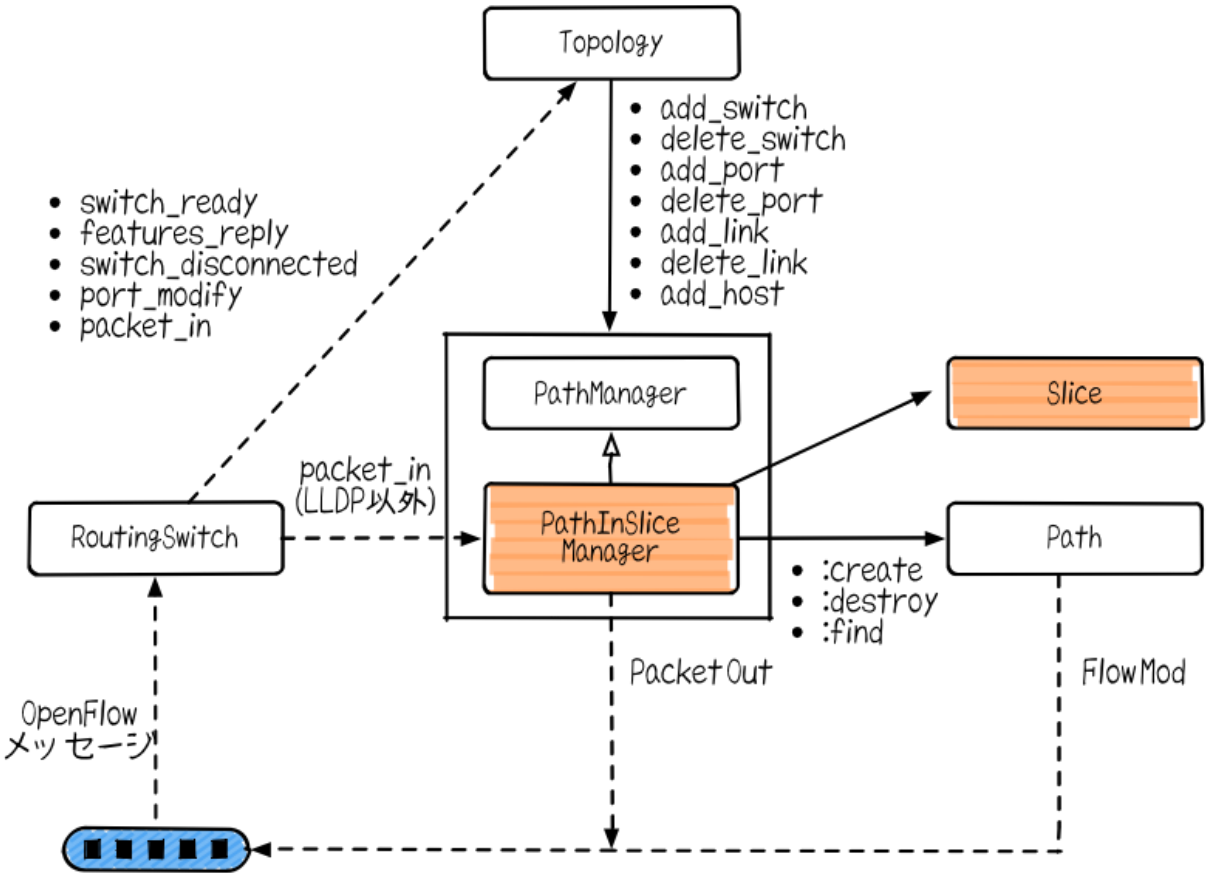
################################### 3 ############### 3 ######################
###

18.7.

########################### 2 ################ (# 17#6)#

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

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



18.6.

18.7.1. ##################

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

18.7.2. #####

#######

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

18.8.

##

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

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

19.

##

19.1.

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

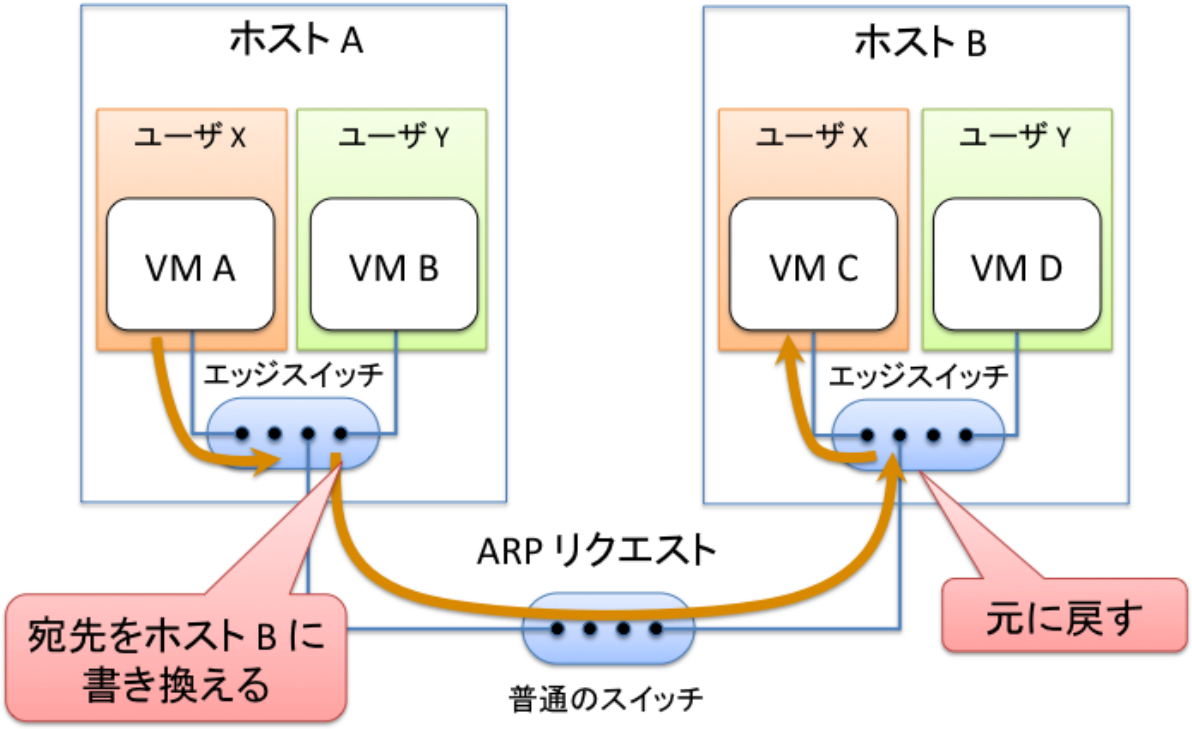
######################### 1 ##
###

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

19.1.1.

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

##



19.1.

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

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

#17#############
##
###

19.2.

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

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

19.2.1.

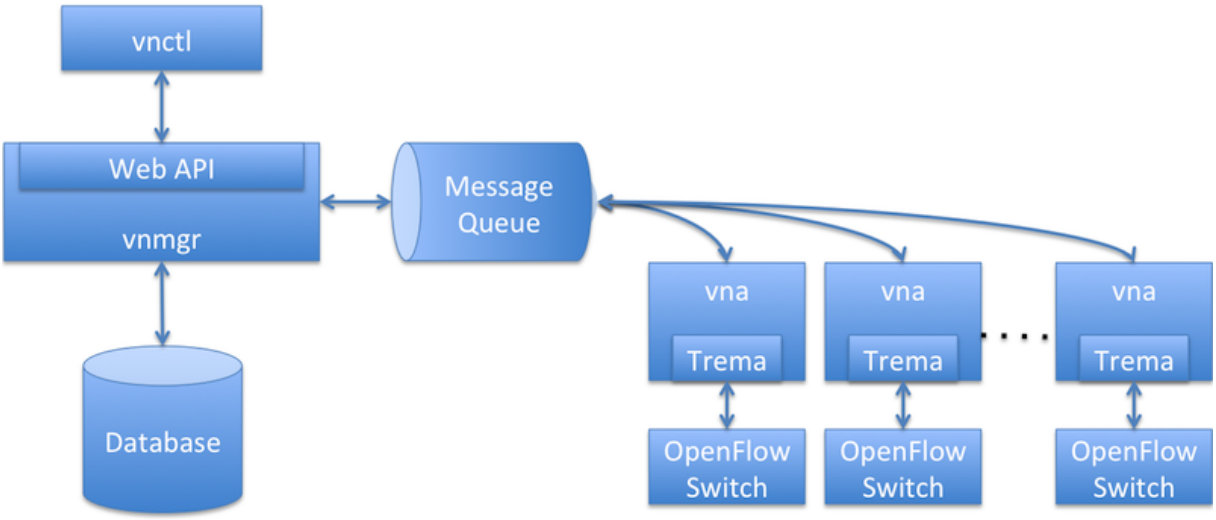
###
###

19.2.2.

##
#######################10###############10##############100################
####################################

19.3.

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



19.2.

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

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

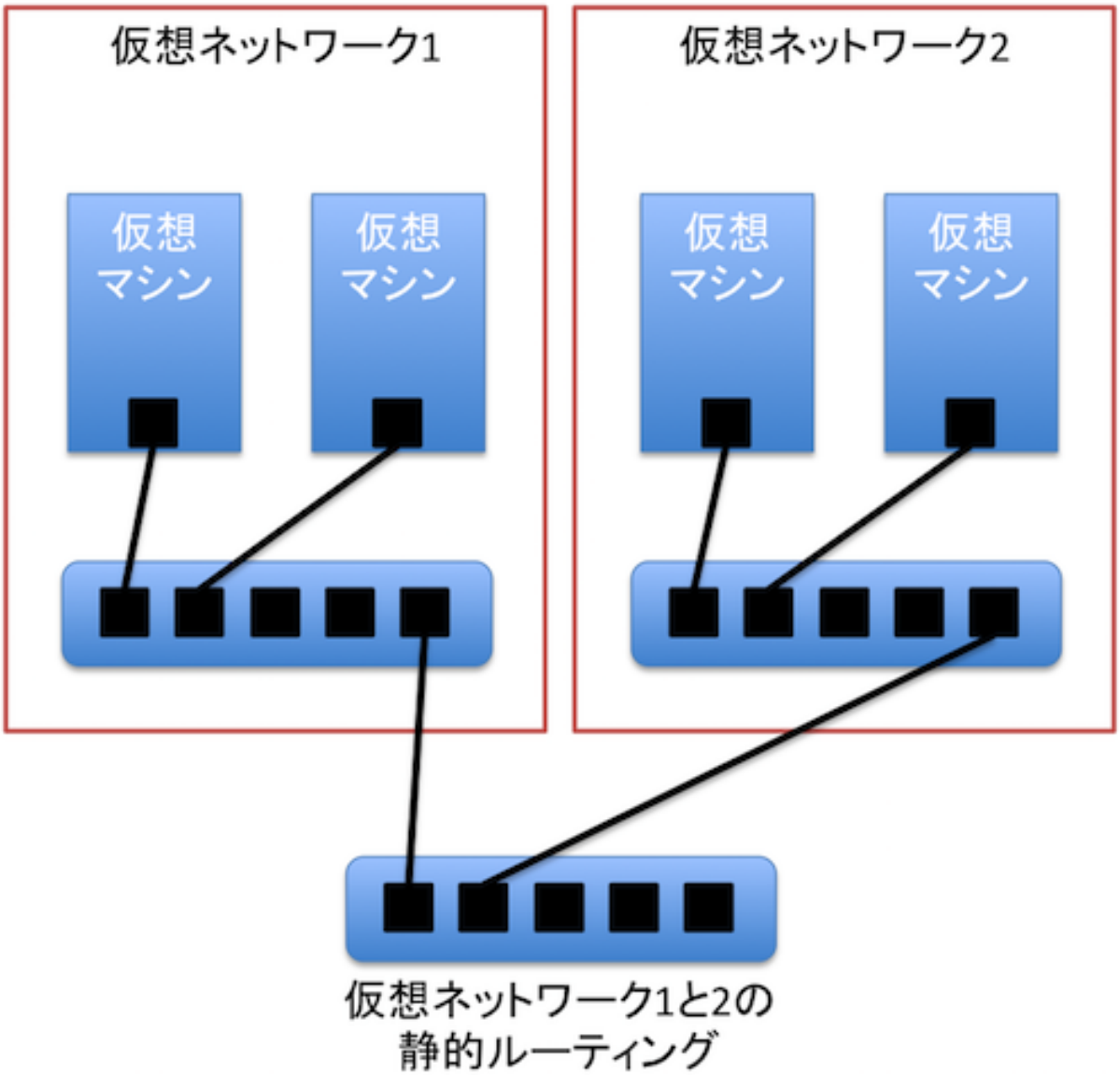
19.4.

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

1. ##################
2. ########################
3. ###########
4. ####################

19.4.1.

##
##

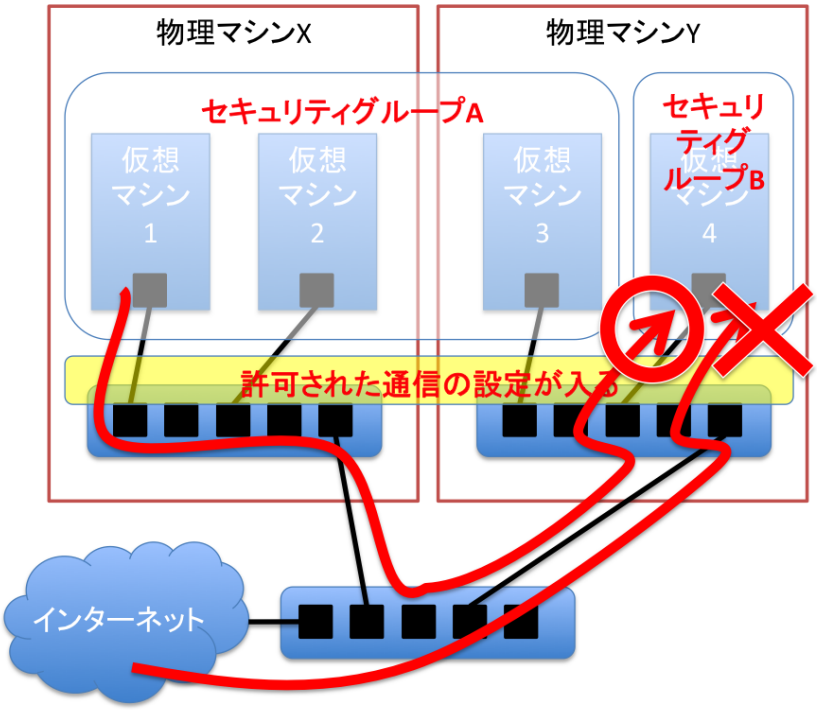


19.3.

##
#########

19.4.2.

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

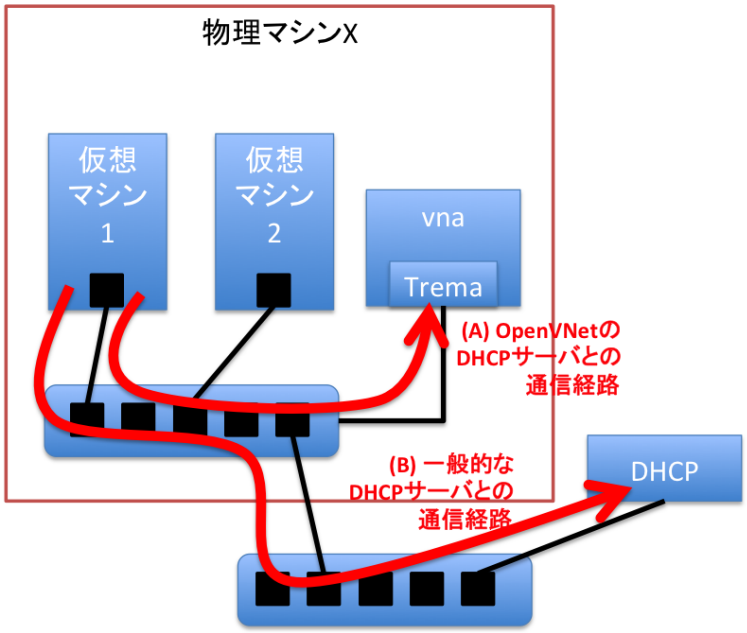


19.4.

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

19.4.3.

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



19.5.

###

19.4.4.

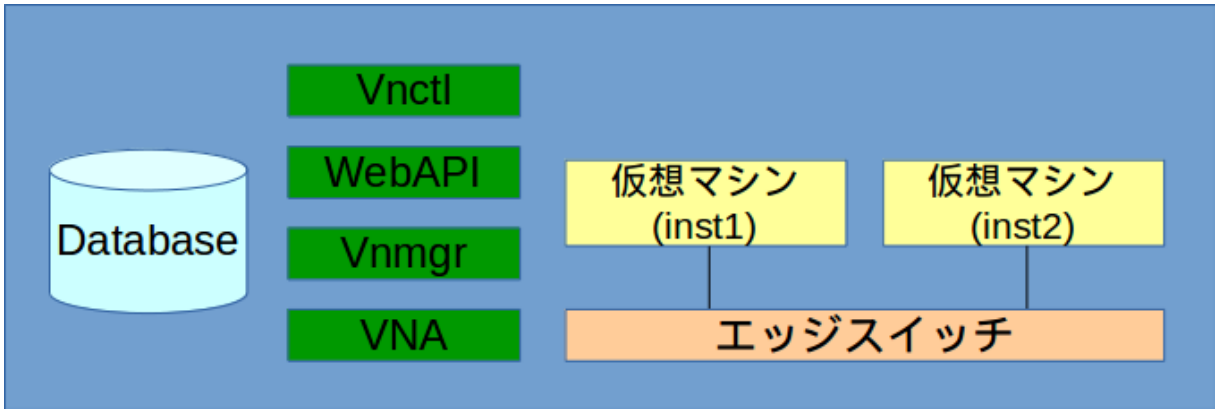
######2###

###

19.5.

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

- ###### 6.6##(######6#)###############
- #########



19.6. 1####################

19.5.1.

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

1. ###############
2. ##################
3. ##########
4. #########

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

######### yum ################################ openvnet.repo # /etc/yum/repos.d/ ######################

```
$ sudo curl -o /etc/yum.repos.d/openvnet.repo -R https://raw.githubusercontent.com/axsh/openvnet/master/deployment/yum_repositories/stable/openvnet.repo
```

openvnet-third-party.repo # /etc/yum.repos.d/

```
$ sudo curl -o /etc/yum.repos.d/openvnet-third-party.repo -R https://raw.githubusercontent.com/axsh/openvnet/master/deployment/yum_repositories/stable/openvnet-third-party.repo
```

epel-release

```
$ sudo yum install -y epel-release
```

################################## openvnet ################################
###################

```
$ sudo yum install -y openvnet
```

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

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

```
$ sudo yum install -y mysql-server redis
```

##########

br0 ############################ inst1 ### inst2 ###2#######################
br0 ########### /etc/sysconfig/network-scripts/ifcfg-br0 ##############

```
DEVICE=br0
DEVICETYPE=ovs
TYPE=OVSBridge
ONBOOT=yes
BOOTPROTO=static
HOTPLUG=no
OVS_EXTRA="
 set bridge    ${DEVICE} protocols=OpenFlow10,OpenFlow12,OpenFlow13 --
 set bridge    ${DEVICE} other_config:disable-in-band=true --
 set bridge    ${DEVICE} other-config:datapath-id=0000aaaaaaaaaaaa --
 set bridge    ${DEVICE} other-config:hwaddr=02:01:00:00:00:01 --
 set-fail-mode  ${DEVICE} standalone --
 set-controller ${DEVICE} tcp:127.0.0.1:6633
"
```

######### datapath-id # 0000aaaaaaaaaaaa ####################################
###########16##################################

#########

####### openvswitch ###################

```
$ sudo service openvswitch start
$ sudo ifup br0
```

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

```
$ sudo service mysqld start
```

##

```
$ PATH=/opt/axsh/openvnet/ruby/bin:${PATH}
```

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

```
$ cd /opt/axsh/openvnet/vnet
$ bundle exec rake db:create
$ bundle exec rake db:init
```

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

```
$ service redis start
```

(`vnmgr` # `webapi` # `vna`)

```
$ sudo initctl start vnet-vnmgr
$ sudo initctl start vnet-webapi
```

`vnctl` ################################## `vna` ############# ######## ## #########

```
$ vnctl datapaths add --uuid dp-test1 --display-name test1 --dpid 0x0000aaaaaaaaaaaa --node-id vna
```

`vna` # ######## ## ########### `vna`

```
$ sudo initctl start vnet-vna
```

`ovs-vsctl` ###### `vna`

```
$ ovs-vsctl show
fbe23184-7f14-46cb-857b-3abf6153a6d6
    Bridge "br0"
        Controller "tcp:127.0.0.1:6633"
```

```
        is_connected: true
```

is_connected: true ############ vna

##########2#######(inst1 # inst2)##
############################

```
$ sudo yum -y install lxc lxc-templates
```

lxc ### lxc-templates ################################ cgroup #######

```
$ sudo mkdir /cgroup
$ echo "cgroup /cgroup cgroup defaults 0 0" >> /etc/fstab
$ sudo mount /cgroup
```

############## lxc-create ##### rsync ###########

```
$ sudo yum install -y rsync
```

########################## inst1 # inst2 #######

```
$ sudo lxc-create -t centos -n inst1
$ sudo lxc-create -t centos -n inst2
```

lxc-create ################## root ##
#######################

############################## /var/lib/lxc/inst1/config #######################

```
lxc.network.type = veth
lxc.network.flags = up
lxc.network.veth.pair = inst1
lxc.network.hwaddr = 10:54:FF:00:00:01
lxc.rootfs = /var/lib/lxc/inst1/rootfs
lxc.include = /usr/share/lxc/config/centos.common.conf
lxc.arch = x86_64
lxc.utsname = inst1
lxc.autodev = 0
```

/var/lib/lxc/inst2/config

```
lxc.network.type = veth
lxc.network.flags = up
lxc.network.veth.pair = inst2
lxc.network.hwaddr = 10:54:FF:00:00:02
lxc.rootfs = /var/lib/lxc/inst2/rootfs
lxc.include = /usr/share/lxc/config/centos.common.conf
lxc.arch = x86_64
lxc.utsname = inst2
lxc.autodev = 0
```

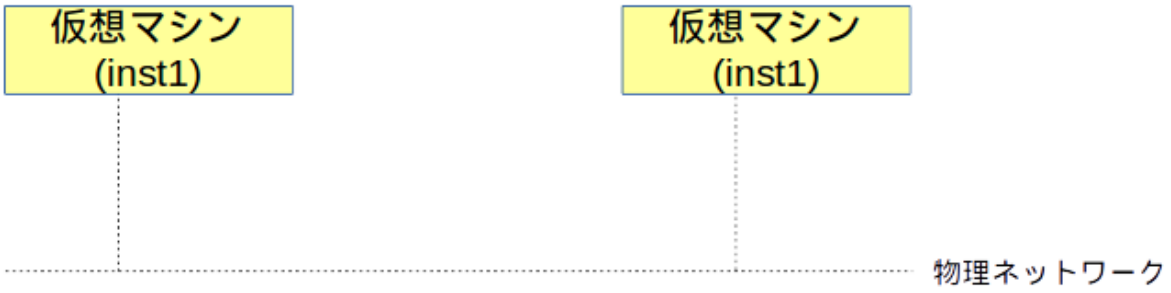
#############################

```
$ sudo lxc-start -d -n inst1
$ sudo lxc-start -d -n inst2
```

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

```
$ sudo ovs-vsctl add-port br0 inst1
$ sudo ovs-vsctl add-port br0 inst2
```

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



19.7.

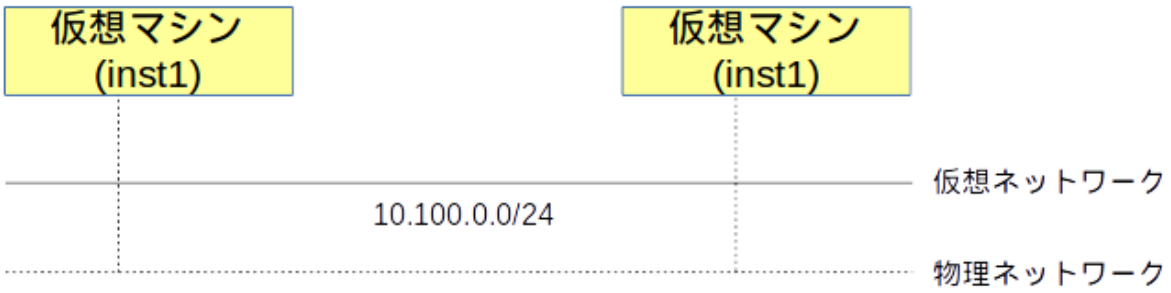
##################1############

19.5.2.

############### vnctl ##############1####################

################## 10.100.0.0/24 ### inst1 ######## 10.100.0.10 # inst2 ########
10.100.0.11 ####### vnctl networks ####################

```
$ vnctl networks add \
  --uuid nw-test1 \
  --display-name testnet1 \
  --ipv4-network 10.100.0.0 \
  --ipv4-prefix 24 \
  --network-mode virtual
```



19.8.

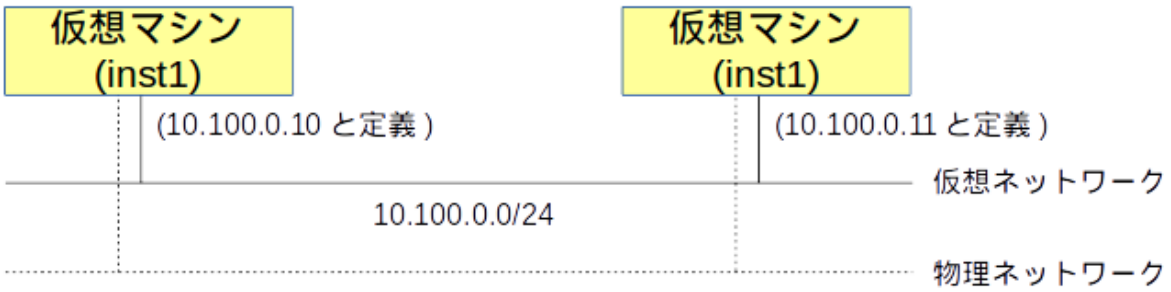
`vnctl` ################### #### `vnctl interfaces` ################ `inst1`

```
$ vnctl interfaces add \
  --uuid if-inst1 \
  --mode vif \
  --owner-datapath-uuid dp-test1 \
  --mac-address 10:54:ff:00:00:01 \
  --network-uuid nw-test1 \
  --ipv4-address 10.100.0.10 \
  --port-name inst1
```

`inst2`

```
vnctl interfaces add \
  --uuid if-inst2 \
  --mode vif \
  --owner-datapath-uuid dp-test1 \
  --mac-address 10:54:ff:00:00:02 \
  --network-uuid nw-test1 \
  --ipv4-address 10.100.0.11 \
  --port-name inst2
```

################## `10.100.0.0/24` ###################### `10.100.0.10` # `10.100.0.11` # ##############################



19.9.

19.5.3.

####2#################################### inst1 ######################

```
$ lxc-console -n inst1
$ ip addr show
```

######## inst1 # eth0 ##
################################

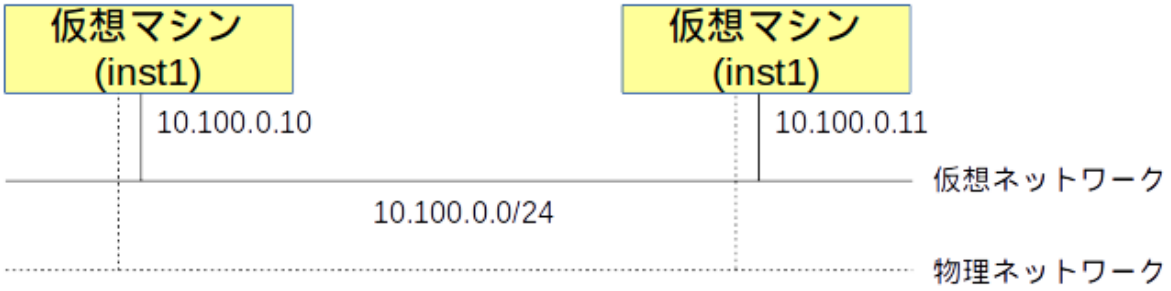
inst1 ################### eth0 ####### 10.100.0.10 ########### vnctl ##### inst1
##################################

```
$ ip addr add 10.100.0.10/24 dev eth0
```

##1####### inst2 ############# inst2 # eth0 ############# 10.100.0.11 ###

```
$ lxc-console -n inst2
$ ip addr add 10.100.0.11/24 dev eth0
```

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



19.10.

######### ping ############# inst2 ## inst1 # ping #######

```
$ ping 10.100.0.10
```

##

###1############### inst2 # eth0 ############# 10.100.0.11/24 ## 10.100.0.15/24 ###########

```
$ sudo ip addr del 10.100.0.11/24 dev eth0
$ sudo ip addr add 10.100.0.15/24 dev eth0
```

########### inst1 #### ping #########

```
$ ping 10.100.0.10
```

10.100.0.0/24 ################### ################################### inst2 ######## 10.100.0.11 ##############

19.6.

###

19.6.1.

[1]

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

###

[1] #########################(#####://####.######.###/)#######

##

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

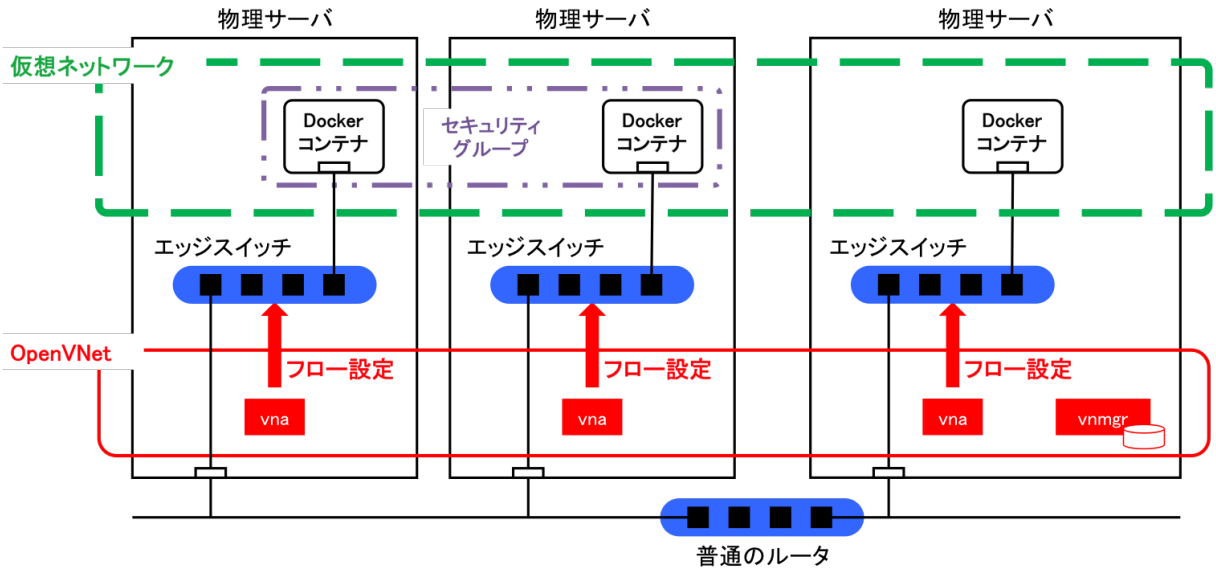
###

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

1. ################# ################
2. ##################################
3. #########################
4. ####################################
5. ##
6. ############################
7. ####################################
8. ##

###

###



19.11.

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

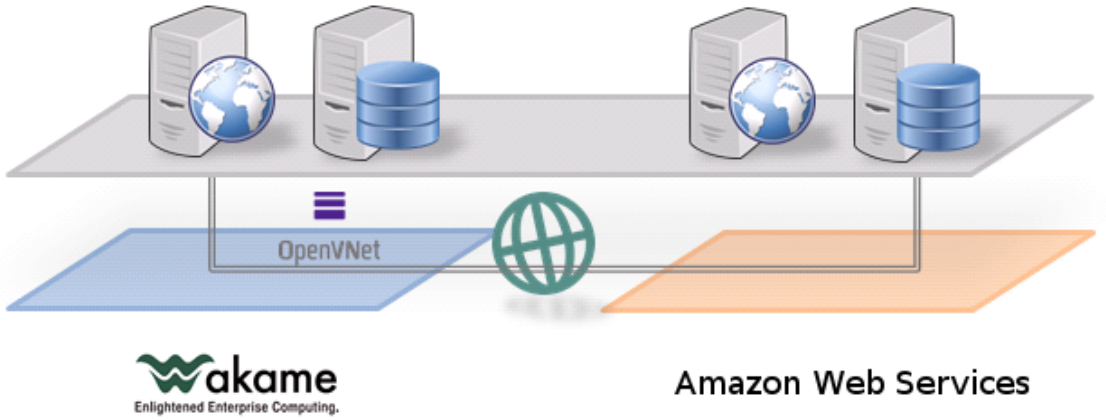
19.6.2.

###

###
##

###
###

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



19.12.

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

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

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

[2] #####://######.###/###########/########
[3] #####://######.###/#######################/###############

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

19.7.

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

- ######## ##
- ####################################
- ##
- ####3###

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

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

3.0:

- ####://###.###.###/########/####3.0.####