人工智能在漏洞发现中的运用之虚与实

Kang Li

kangli.ctf@gmail.com

自我介绍

乔治亚大学教授

Disekt、*SecDawgs* CTF 团队创始人

xCTF 和蓝莲花团队启蒙导师

2016 年 DARPA Cyber Grand Challenge 决赛获奖者

disekt

CTF Team

人工智能应用新浪潮

- 由广泛学习和深度学习驱动
- 由海量数据集提供支持

公众什么时候将技术视为人工智能？

在它击败人的时候！

AI & CGC


CYBER
GRAND CHALLENGE
DARPA
CYBER
SCORING
MAYHEM
SECURE
DARPA

比赛之前

AUGUST 4, 2016 | BY NATE CARDOZO AND PETER ECKERSLEY AND JEREMY GILLULA

Does DARPA's Cyber Grand Challenge Need A Safety Protocol?

比赛之后

DARPA's king Robo-hacker "Mayhem" proves no match for humans

SECURITY AND PRIVACY 12th August 2016 Matthew Griffin 0

Scoreboard

place	score	team
1	15	PPP
2	14	b1o0p
3	13	DEFKOR
4	12	HITCON
5	11	KaisHack GoN
6	10	LC↘BC
7	9	Eat Sleep Pwn Repeat
8	8	binja
9	7	pasten
10	6	9447
11	5	!SpamAndHex
12	4	Shellphish
13	3	Dragon Sector
14	2	侍
15	1	Mayhem

人工智能在安全领域的应用

机器学习已经广泛用于

- 恶意软件检测
- 垃圾邮件和网络钓鱼分类
- 帐户异常检测和日志分析等

机器学习应用的最新变化

- 数据规模和算法复杂度发生变化

两种“随机”机器学习应用实例

Esorics 2013

机器学习分类器

-30 多种特性
- 超过 1.5 万培训样本
-线性和简单的非线性算法（随机森林）
- 使用 Weka

APK 恶意软件分类器

Blackhat EU 2016

深度神经网络分类器

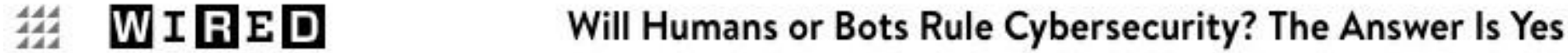
- 1000 多种特性
- 超过 1,500 万培训样本
- 复杂的非线性算法
- 使用 PaddlePaddle

深度学习在 CGC 中的使用

使用深度学习的 CGC 团队的数量: 0

为什么不用呢?（我们的回答）

- 没有能够定义成分类问题
- 没有丰富的数据集（用于培训）



“还有其他类型的人工智能，研究不局限于统计学习。”

DARPA 信息创新部门负责人 John Launchbury 表示。

https://www.wired.com/2016/08/will-humans-bots-rule-cybersecurity-answer-yes/

AI & FUZZING

Fuzzing 二进制程序（在CGC场景下）

如何生成一个让给定二进制程序“崩溃”的输入？

'\x06\x1d\x0c\x08%7$s\n\x1f\x1d\x0c\x08%7$s\n'

Fuzzing 二进制程序（在CGC场景下）

如何生成一个让给定二进制程序“崩溃”的输入？

'\x06\x1d\x0c\x08%7$s\n\x1f\x1d\x0c\x08%7$s\n'

没有“大”数据供挖掘！首先需要找到生成输入的方法

Dumb Fuzzing

生成随机输入突变并运行目标

例如 *afl-fuzz –n*

Dumb Fuzzing

生成随机输入突变并运行目标

例如 *afl-fuzz –n*

人工 **Fuzzing**

人类如何生成新的“有趣的”输入？

人工 Fuzzing

人类如何生成新的“有趣的”输入？

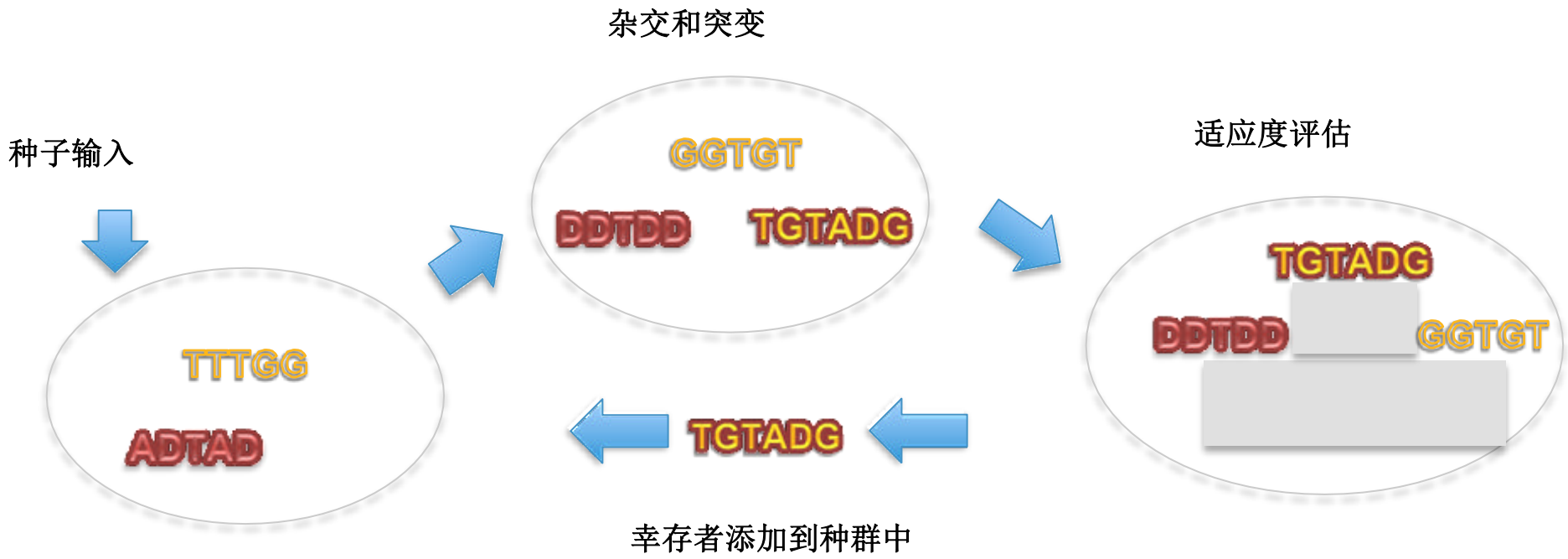
跟踪和观察覆盖范围，然后生成可到达未测试代码的输入

人工智能的演变分支

遗传算法 -- 基于自然选择过程

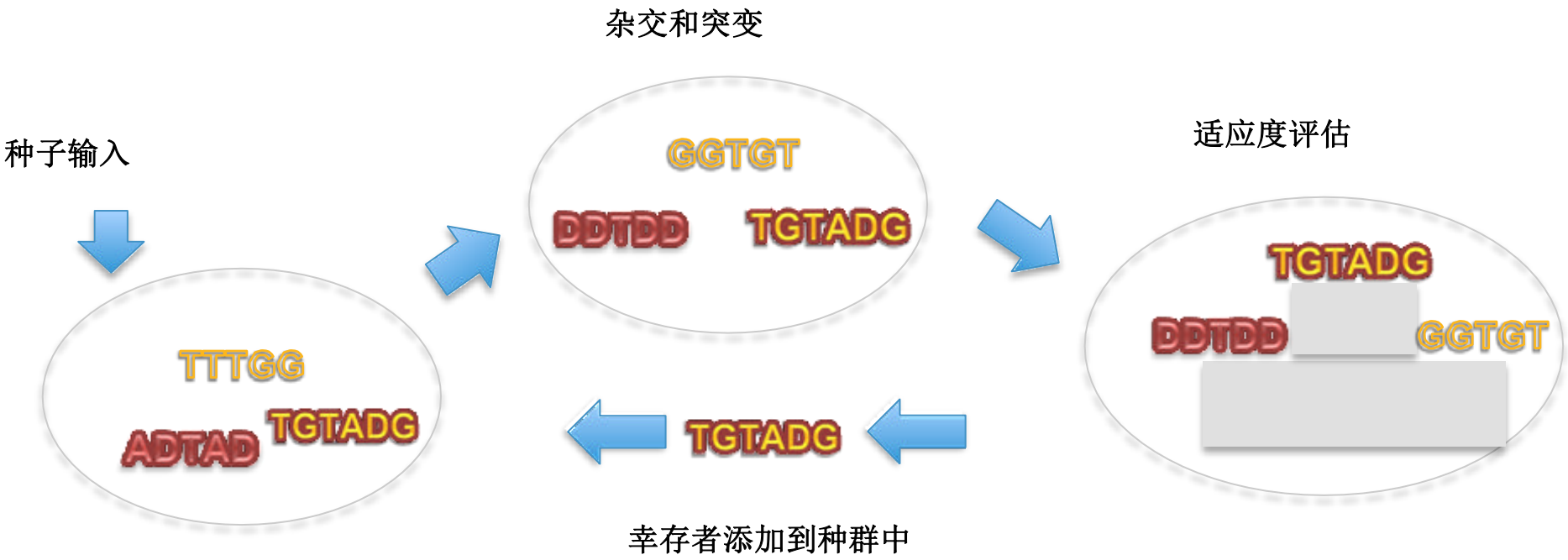
人工智能的演变分支

遗传算法 -- 基于自然选择过程



人工智能的演变分支

遗传算法 -- 基于自然选择过程



AFL - Fuzzing 对遗传算法的使用

通过种子输入变换生成新的输入

位翻转/字节翻转/整数运算……

从每次测试运行中获取反馈

测试控制流路径覆盖

进行适应性测试和突变选择

如果触发新的边缘覆盖➔ 添加到种子种群

AFL 插桩

来自*dwarfdump/print_abbrevs.c*

… ...

```
328    if (abbrev_code > 0)
{ 329      check_abbrev_num_sequence(…,
330           …);
331        while (abbrev_code >= abbrev_array_size) {
332
333          Dwarf_Unsigned old_size = abbrev_array_size;
             size_t addl_size_bytes = old_size *
             … ...
```

BB1

BB2

通过更新 64KB 共享内存区域 (afl_area_ptr [ ]) 收集覆盖信息

AFL 插桩

来自*dwarfdump/print_abbrevs.c*

```
            … ...
328    if (abbrev_code > 0)
{ 329      check_abbrev_num_sequence(…,
330            …);
331        while (abbrev_code >= abbrev_array_size) {
332            Dwarf_Unsigned old_size = abbrev_array_size;
333            size_t addl_size_bytes = old_size *
               … ...
```

afl_area_ptr [cur_loc ^ prev_loc**]++;**

通过更新 64KB 共享内存区域 (afl_area_ptr [ ]) 收集覆盖信息

AFL 的成功

快速和可靠的 Fuzzing

测试开销低，使用简单

漏洞发现实例

Bind、PuTTY、tcpdump、ffmpeg、GnuTLS、libtiff、libpng……更多信息请查看 AFL 网站 (http://lcamtuf.coredump.cx/afl/)

被广泛使用

大多 2016 CGC 获奖团队都使用了这种插桩技术

AFL 面临的挑战

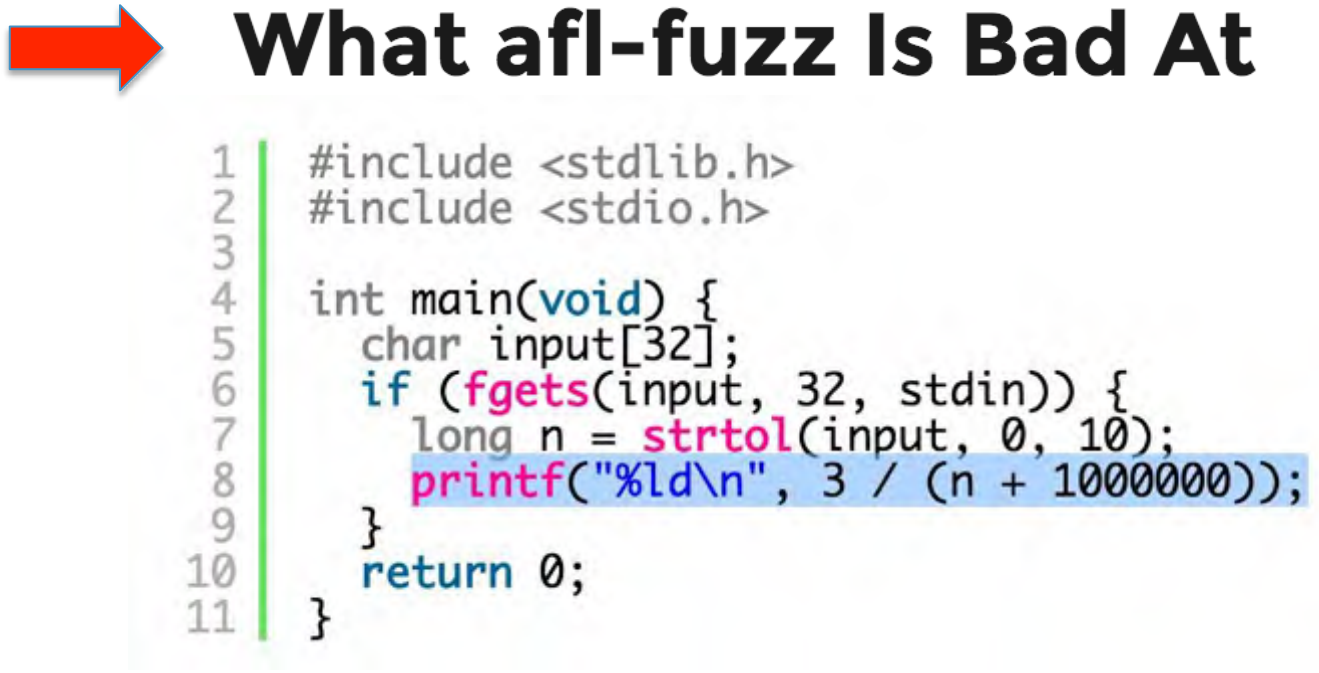
```
... ...

if (input == 0xDEADBEEF)
    crash();
else
    good();

... ...
```

通过输入突变触发崩溃分支的几率非常低！

AFL 面临的挑战（续）

来自 **Regehr** 教授的博客

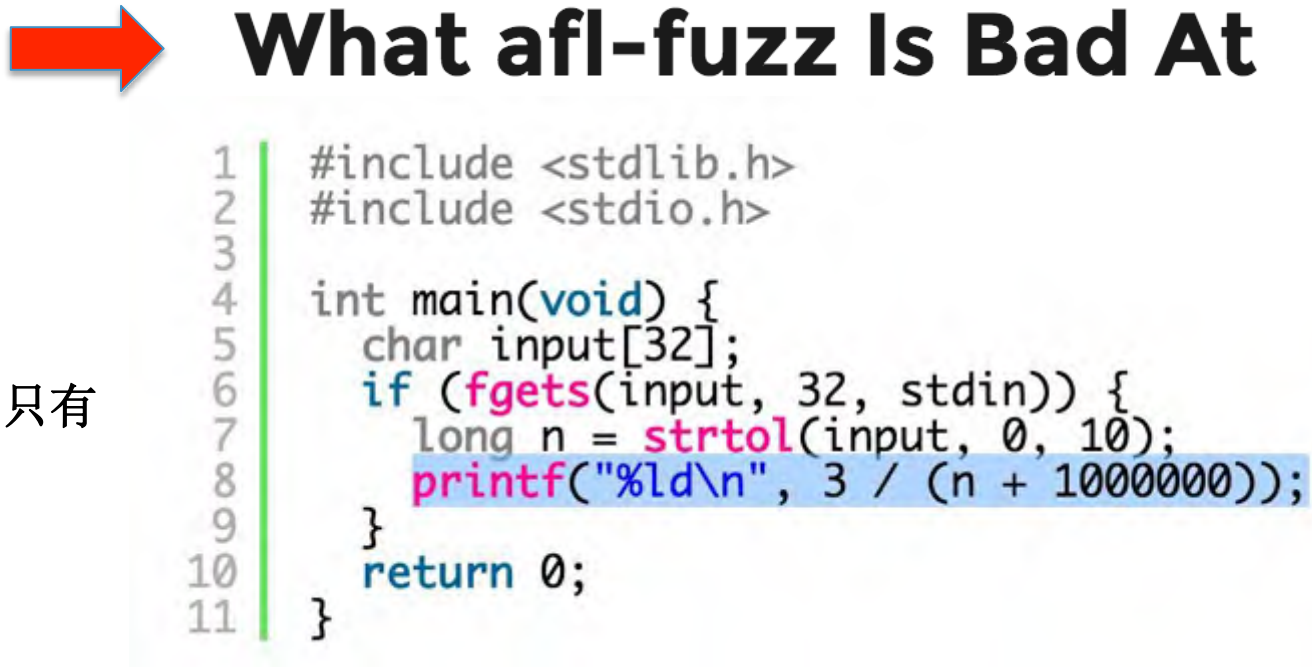
http://blog.regehr.org/archives/1238



AFL 面临的挑战（续）

来自 **Regehr** 教授的博客

http://blog.regehr.org/archives/1238



对于 **n** 的所有数值，只有当 **n == -1000000** 时

才会发生 DIVZ 错误

在 CGC 中我们为 AFL 添加的增强功能

两项增强功能

1. 采用了 QEMU 增强插桩的 AFL (Qai)

2. 采用了符号执行协助的 AFL

AFL 与人工选择的对决

```
… …
ival = func(input);
if (ival == 0xDEADBEEF)
   crash();
else
   good();

… …
```

考虑两种引起 ival 等于下列两个值的输入

1) 0x12345678
2) 0x0000**BEEF**

afl-fuzz 获得相同的覆盖，

但是，人会怎么做？

AFL 与人工选择的对决

```
… …
ival = func(input);
if (ival == 0xDEADBEEF)
  crash();
else
  good();
… …
```

考虑两种引起 ival 等于下列两个值的输入

1) 0x12345678
2) 0x0000**BEEF**

afl-fuzz 获得相同的覆盖，

但是，人会怎么做？

输入 2 可能是促进进一步突变的更好的候选值！

通过代码转换提高几率

```
… …

if (ival == 0xDEADBEEF)
    crash();
```

```
… …
p = (char *)&ival;
if (p[0] == 0xEF) if
   (p[1] == 0xBE)
      if (p[2] == 0xAD)
        if (p[3] == 0xDE)
    crash();
```

选出准确输入的几率

$\sim 1/2^{32}$  $\sim 1/2^{10}$

代码转换

laf-intel 最近公布了具体思路

分割-比较-通过、比较-转换-通过等

https://lafintel.wordpress.com/2016/08/15/circumventing-fuzzing-roadblocks-with-compiler-transformations/

集成到 AFL-llvm 模式中

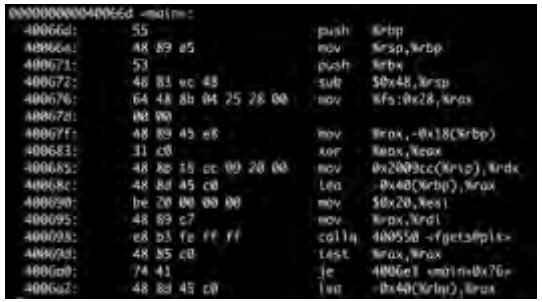
问题：

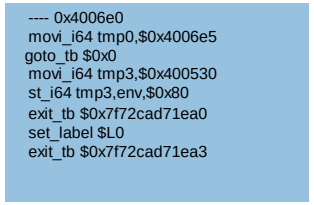
需要重新编译目标程序，但是我们只有二进制程序。

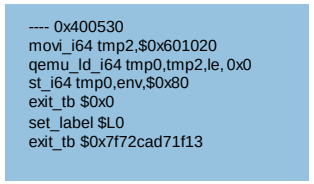
当我们只有二进制程序时，如何为 **AFL** 提供“部分匹配”反馈？

插桩粒度

转化块级别的 AFL QEMU 插桩







afl_area_ptr [position]++;

afl_area_ptr [position]++;

二进制文件

转化块链

我们需要运行时指令级别的插桩

TCG 指令级别的转化

I386

```
80484d7:
cmp  $0xdeadbeef,%eax
```

TCG IR

```
---- 0x80484d7
mov_i32 tmp1,$0xdeafbeef
mov_i32 tmp0,eax
mov_i32 cc_src,tmp1
mov_i32 loc10,tmp0
sub_i32 cc_dst,tmp0,tmp1
```

x86_64

```
…
mov    $0xdeedbeef,%ebp
mov     %ebp,0x28(%r14)
mov    $0x10,%ebx
mov    %ebx,0x34(%r14)
test    %ebp,%ebp
```

TCG 辅助函数！

I386

```
4006d0:        idiv   %rbx
```

TCG IR

```
---- 0x4006d0
mov_i64 tmp0,rbx movi_i64
tmp3,$0x4006d0 st_i64
tmp3,env,$0x80
call idivq_EAX,$0x0,$0,env,tmp0
```

x86_64

```
...
mov    %rbx,0x10(%r14)
movq   $0x4006d0,0x80(%r14)
mov    %r14,%rdi
mov    %rbp,%rsi
callq  0x7f3037453600
```

到 TCG 分支操作的插桩

I386

80484dc:**jne** 80484fe

TCG IR

---- 0x80484dc
movi_i32 cc_op,$0x10
discard loc10
movi_i32 tmp11,$0x0
brcond_i32 cc_dst,tmp11,ne,$L1

调用 **brcond** 辅助函数

if (partial match)
alf_area_ptr[pos]++

采用 QEMU 增强插桩的 AFL

对 TCG 分支操作生成的修改

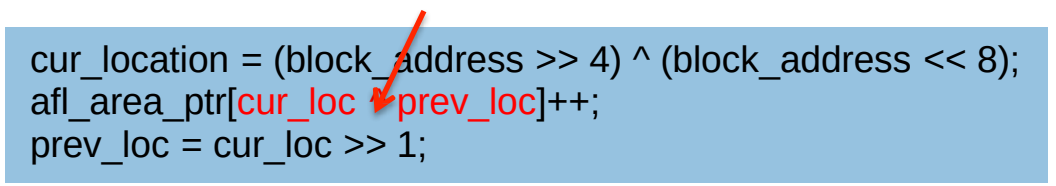
tcg_gen_brcond_i32()

tcg_gen_brcond_i64()

…

添加一个辅助函数来更新覆盖反馈

剩下的问题是：**更新哪些分支边缘？**



AFL-Qai 实现

增强的插桩示例（针对 64 位分支指令）

```
uint64_t HELPER(brcond_states_i64)(uint64_t cond, uint64_t nztest, uint64_t addr)
{
    uint64_t mask = 0xff00000000000000;
    ...
    while (!(cond&mask) && i<8) {
                mask = mask>>8;
                i++;
    }
    if (i>0) {
                fake_edge = (i+1)*addr % bitmap_size;
                afl_area_ptr[fake_edge]++;
   }
...
}
```

采用 QEMU 增强指令的 AFL

为其他指令添加扩充的适应性反馈

例如，增加捕获 DIVZ 错误的几率

```
void helper_idivq_EAX() {
   // if the divisor is close to zero
   afl_area_ptr[addr*matching_factor]++;
}
```

采用 QEMU 增强插桩的 AFL

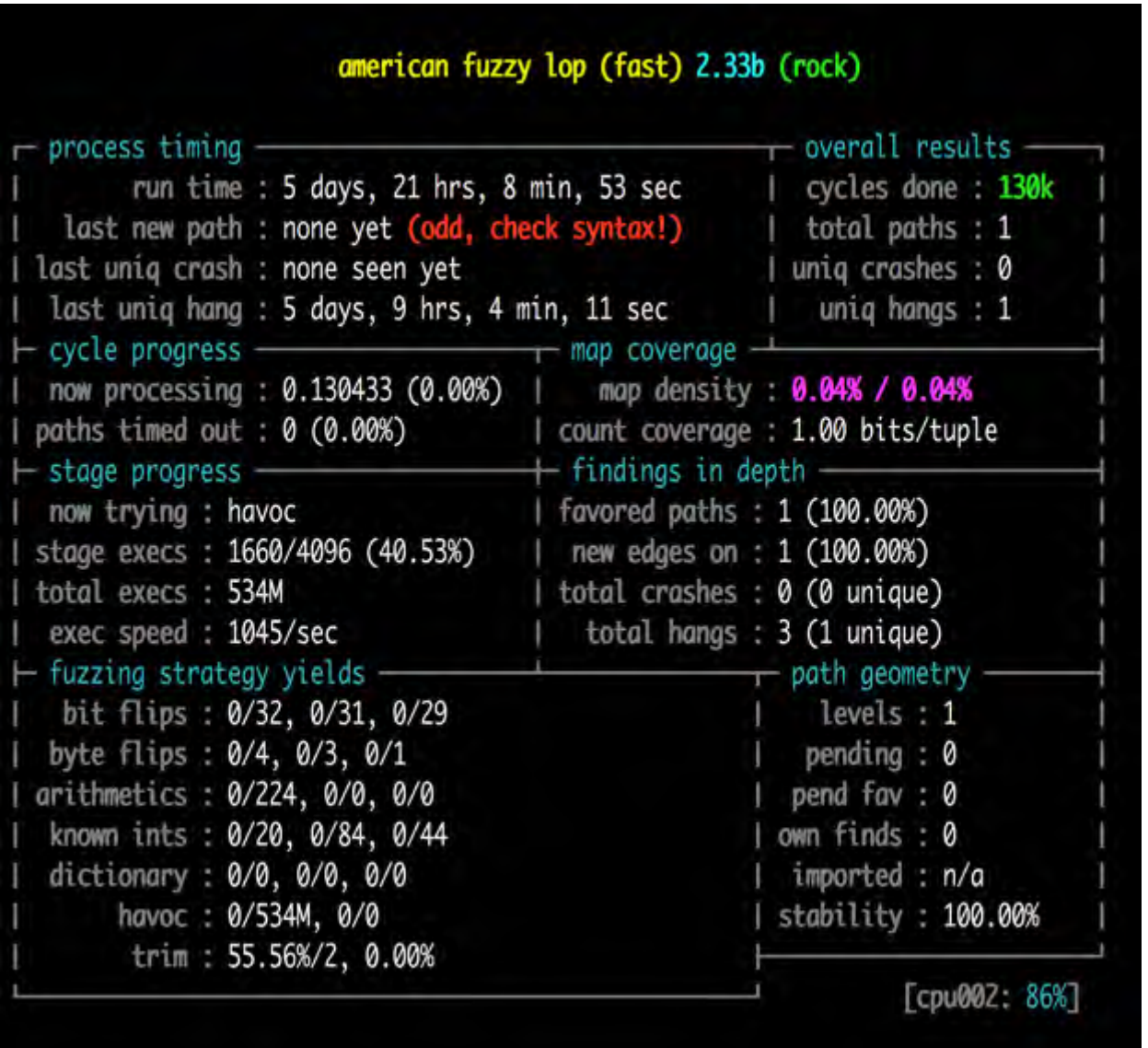
扩充的反馈

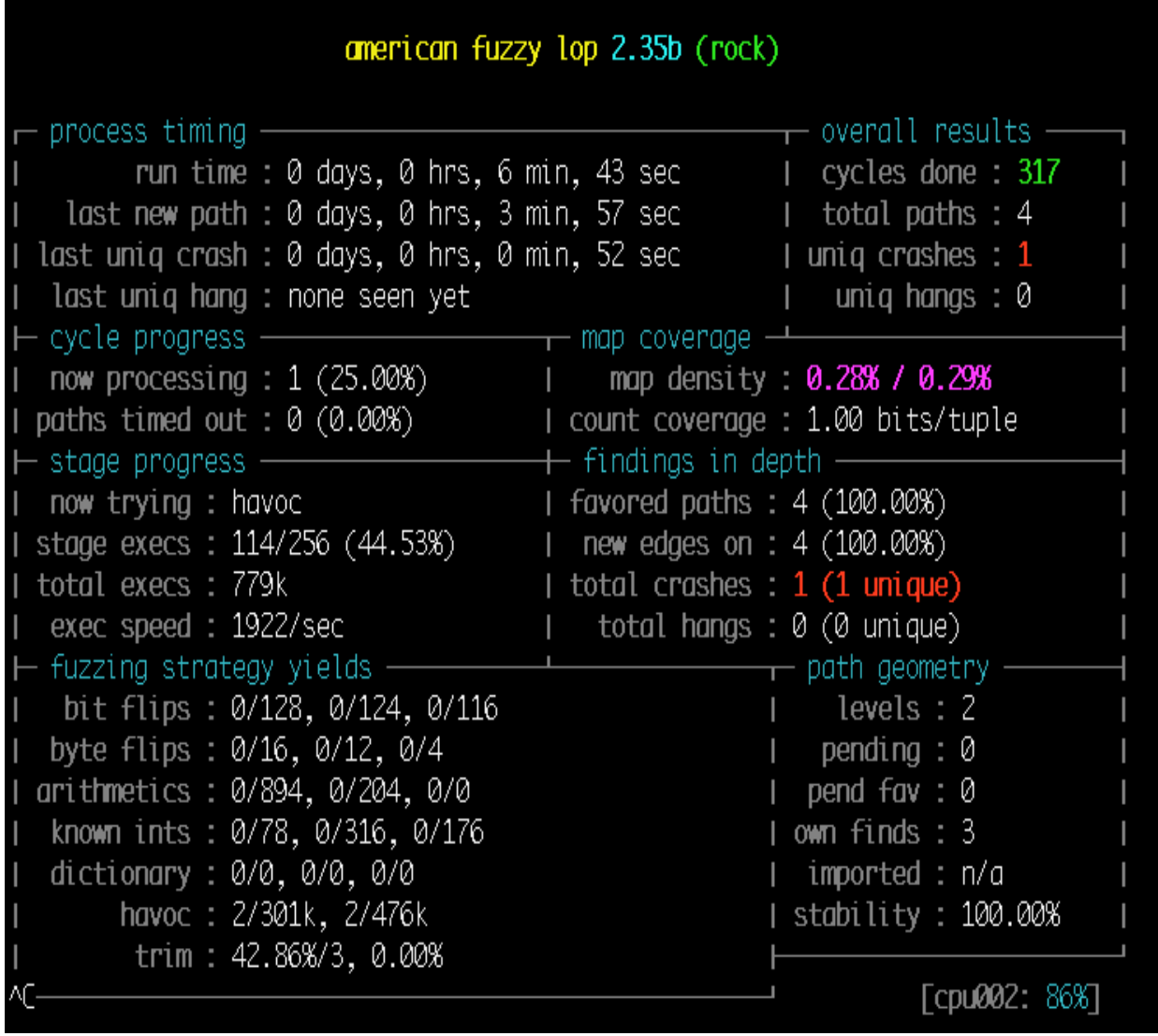
返回更为精细的适应度信息，即使是面向相同的边缘覆盖

例如，更新 afl 共享的内存以进行部分匹配

支持多种二进制平台

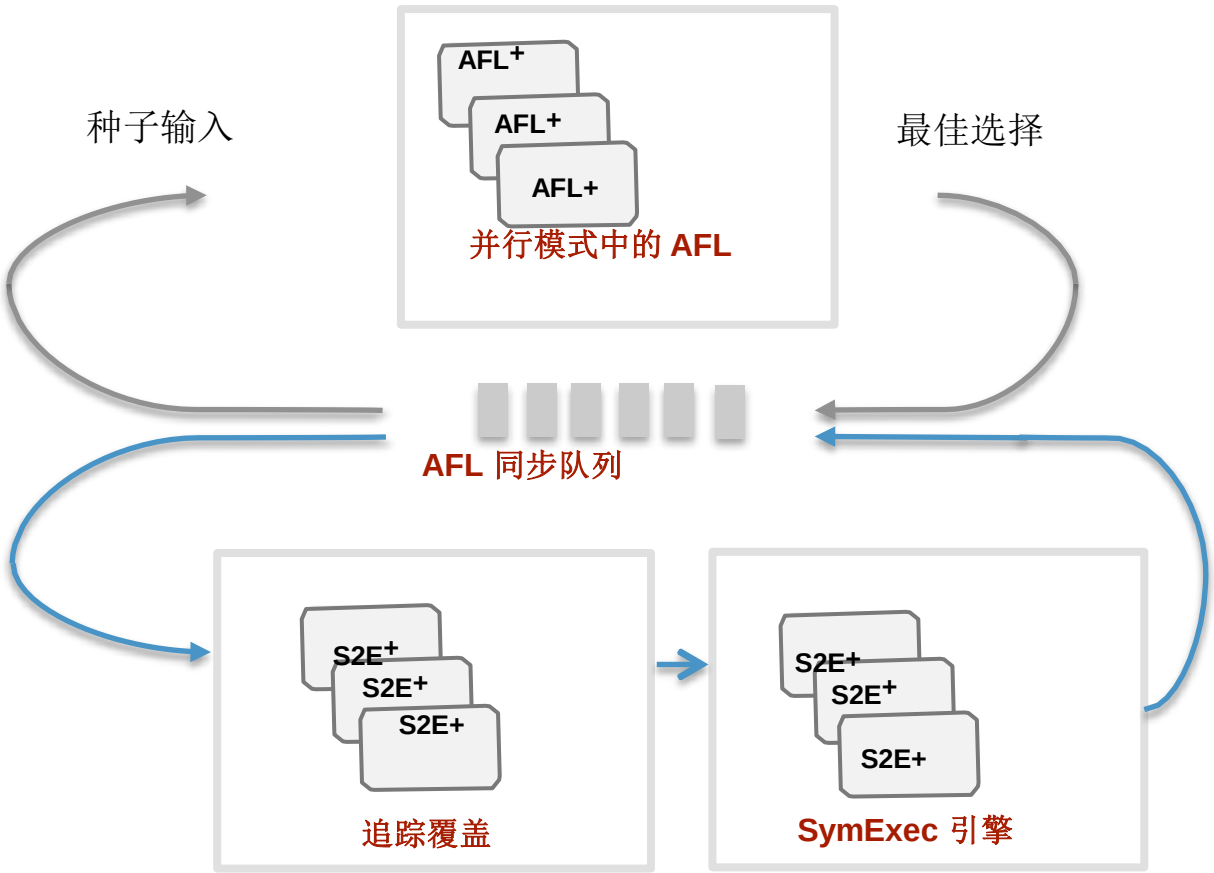
在 QEMU TCG 识别实施，适用于多个架构


american fuzzy lop (fast) 2.33b (rock)
process timing
run time : 5 days, 21 hrs, 8 min, 53 sec
last new path : none yet (odd, check syntax!)
last uniq crash : none seen yet
last uniq hang : 5 days, 9 hrs, 4 min, 11 sec
overall results
cycles done : 130k
total paths : 1
uniq crashes : 0
uniq hangs : 1
cycle progress
now processing : 0.130433 (0.00%)
paths timed out : 0 (0.00%)
map coverage
map density : 0.04% / 0.04%
count coverage : 1.00 bits/tuple
stage progress
now trying : havoc
stage execs : 1660/4096 (40.53%)
total execs : 534M
exec speed : 1045/sec
findings in depth
favored paths : 1 (100.00%)
new edges on : 1 (100.00%)
total crashes : 0 (0 unique)
total hangs : 3 (1 unique)
fuzzing strategy yields
bit flips : 0/32, 0/31, 0/29
byte flips : 0/4, 0/3, 0/1
arithmetics : 0/224, 0/0, 0/0
known ints : 0/20, 0/84, 0/44
dictionary : 0/0, 0/0, 0/0
havoc : 0/534M, 0/0
trim : 55.56%/2, 0.00%
path geometry
levels : 1
pending : 0
pend fav : 0
own finds : 0
imported : n/a
stability : 100.00%
[cpu002: 86%]

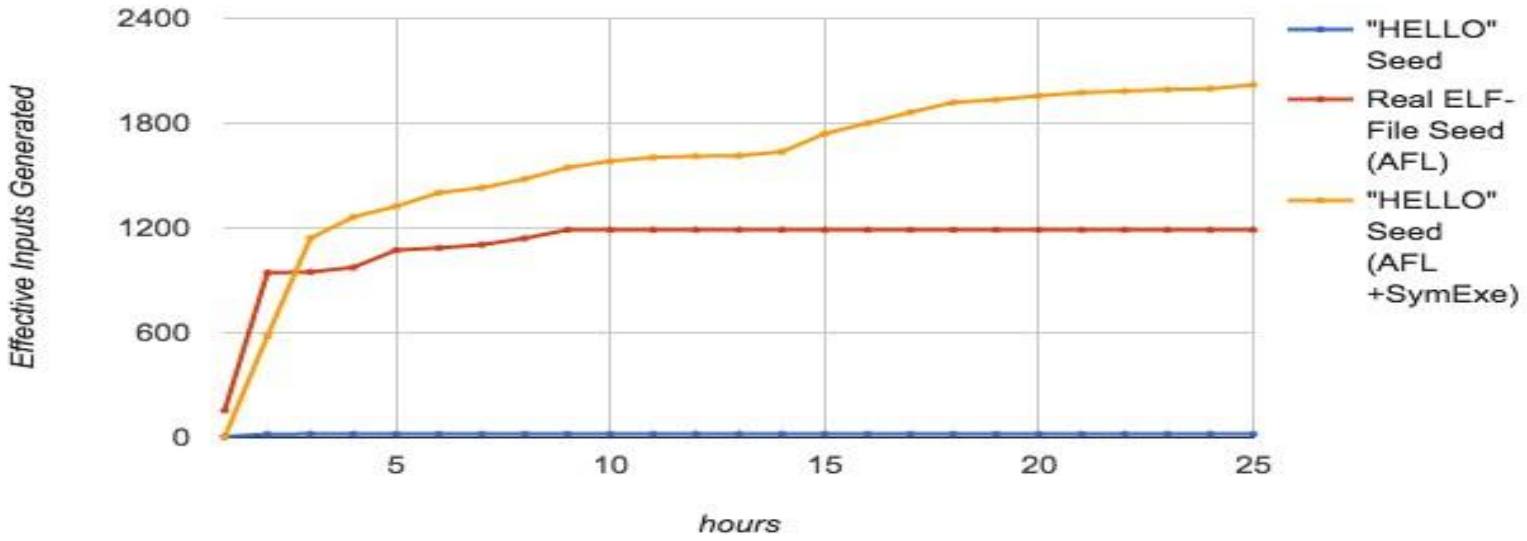

american fuzzy lop 2.35b (rock)
process timing
run time : 0 days, 0 hrs, 6 min, 43 sec
last new path : 0 days, 0 hrs, 3 min, 57 sec
last uniq crash : 0 days, 0 hrs, 0 min, 52 sec
last uniq hang : none seen yet
overall results
cycles done : 317
total paths : 4
uniq crashes : 1
uniq hangs : 0
cycle progress
now processing : 1 (25.00%)
paths timed out : 0 (0.00%)
map coverage
map density : 0.28% / 0.29%
count coverage : 1.00 bits/tuple
stage progress
now trying : havoc
stage execs : 114/256 (44.53%)
total execs : 779k
exec speed : 1922/sec
findings in depth
favored paths : 4 (100.00%)
new edges on : 4 (100.00%)
total crashes : 1 (1 unique)
total hangs : 0 (0 unique)
fuzzing strategy yields
bit flips : 0/128, 0/124, 0/116
byte flips : 0/16, 0/12, 0/4
arithmetics : 0/894, 0/204, 0/0
known ints : 0/78, 0/316, 0/176
dictionary : 0/0, 0/0, 0/0
havoc : 2/301k, 2/476k
trim : 42.86%/3, 0.00%
path geometry
levels : 2
pending : 0
pend fav : 0
own finds : 3
imported : n/a
stability : 100.00%
^C
[cpu002: 86%]

AFL + SymEXC

采用了符号执行的 AFL



采用 SymExec Aid 的 AFL



对照 *readelf* 程序运行 AFL （单个 AFL 实例）

总结

关于深度学习和 CGC

1. 在 2016 年 CGC 中，没有团队使用深度学习
2. 需要制定分类问题，并且需要数据

在漏洞发现中更多地运用人工智能的潜力

1. 挖掘漏洞模式

   还没有采用深度学习（机遇？）

2. 人工辅助 fuzzing

   如何充分运用人类洞察？

总结（续）

我们提升 AFL Fuzzing 智能的方法

1. 使用更精细覆盖插桩的 Fuzzing

2. 采用符号执行协助的 Fuzzing

致谢

Disekt 团队

Michael Contreras、Rober Lee Harrison、Yeongjin Jang、Taesoo Kim、Byoung Young Lee、Chengyu Song、Kevin Warrick、Insu Yun

及其他合作者

Manos Antonakakis、Babak Rahbarinia、Roberto Perdisci、Phani Vadrevu、Qixue Xiao、Guodong Zhu

问答

kangli.ctf@gmail.com