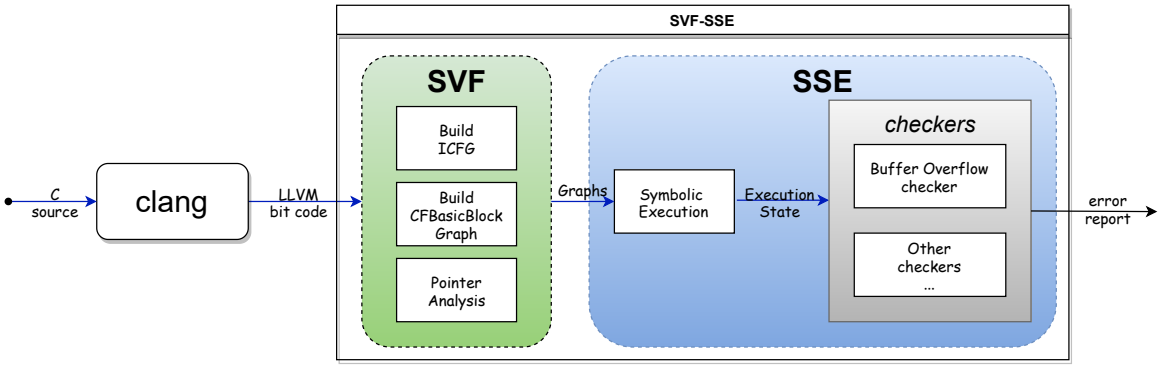
SVF-SSE 简介

SVF-SSE (SVF Static Symbolic Execution)是一个程序静态分析器，能够输入LLVM比特流文件，并输出比特流文件的缺陷检测报告。其主要可以分为两个模块：SVF Symbolic Execution模块和SSE Defect Checker模块。逻辑关系图如下：



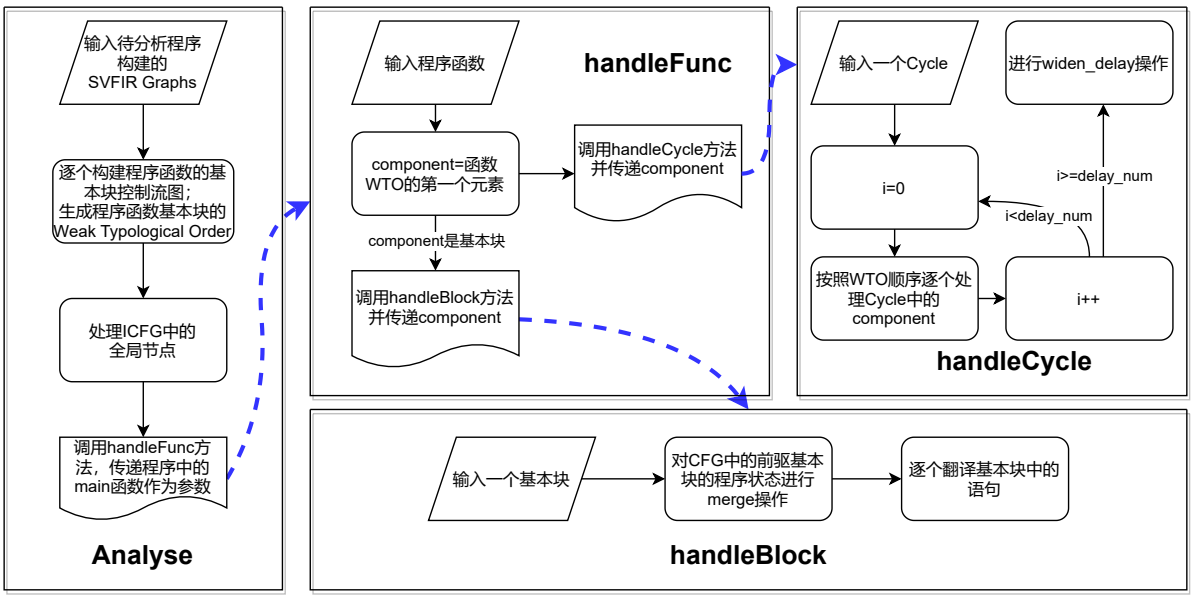
其中，SVF Symbolic Execution模块主要是通过静态符号执行的原理，构建出关于输出程序中变量的可取范围推断；SSE Defect Checker模块则是利用所构建的变量可取范围推断，进一步推断出程序中可能出现的错误，如缓冲区溢出错误等。

SSE Symbolic Execution模块设计文档

SSE

`SSE` (Static Symbolic Execution) 是进行静态符号执行的主要模块，以该类型为父类，可以定制各种缺陷探测client，`BufferOverflowChecker`就是其中一种，用于检测缓冲区溢出缺陷。

流程图



伪代码

```
# Psudo code: Static Symbolic Execution

# entry of the whole analysis
def analyze(program):
    for func in program:
        # build basic block control flow graph for given func
        func_basic_block_graph = build_basic_block_CFG(func)
        # generate weak typological order of the built basic block CFG of func
        func_wto = generate_weak_typological_order(func_basic_block_graph)

    # handle global nodes in func's CFG
    handleGlobalNode()

    handleFunc(main_func) # handle main func of the given program

def handleFunc(func):
    for component in func_weak_typological_order:
        if component is cycle: # is cycle
            handleCycle(component)
        else: # is basic block
            handleBlock(component)

def handleCycle(cycle):
    # before widen_delay, do normal executions
    for i in (0, widen_delay_num):
        # handle cycle's head basic block node
        handleBlock(cycle_head)

        # handle other blocks in cycle
        for component in cycle:
            if component is cycle: # is cycle
                handleCycle(component)
            else: # is basic block
                handleBlock(basic_block)

    # after looping steps >= widen_delay_num
    do_widen_delay_stuffs()

def handleBlock(basic_block):
    # merge Execution State of predecessor blocks
    mergePreBlockES()
    # handle each statement in the basis block
    for statement in basic_block:
        if statement is call:
            handleFunc(caller)
        else:
            SVFIR2ExeState.translate_to_Exe_State(statement)
```

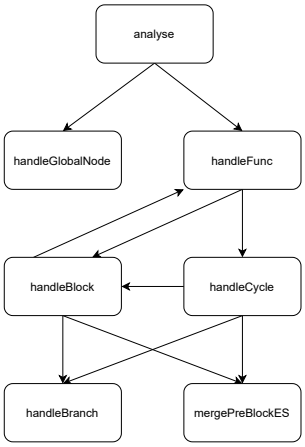
variables

Type	Name	Description
ICFG *	icfg	表示被分析程序的过程间控制流图
Map<const CFBasicBlockEdge*, IntervalExeState>	esMap	表示`CFBasicBlockEdge`与执行完该边入节点基本块后一刻的`IntervalExeState`之间的对应关系
Map<const CFBasicBlockNode*, IntervalExeState>	entryNodeToES	表示函数入口基本块与其执行前一刻的执行状态之间的对应关系，由callsite指令信息生成
PTACallGraph *	callgraph	

Type	Name	Description
CFBasicBlockGraph *	_curGraph	表示当前正在处理的函数所对应的CFBasicBlockGraph
Map<const CFBasicBlockGWTOCycle *, IntervalExeState>	wtocycleMap	
Map<const ICFGNode *, IntervalExeState>	assertMap	
Map<const SVFFunction *, CFBasicBlockGWTO *>	funcWto	表示`SVFFunction`与`CFBasicBlockGWTO`之间的对应关系
Map<const CFBasicBlockGWTOComp*, const SVFFunction *>	wtoFunc	表示`CFGBasicBlockGWTO`中的每个`CFBasicBlockGWTOComp`节点和该序列所属的函数之间的对应关系
Map<const SVFFunction, *CFBasicBlockGraph*>	funcToCFBG	表示`SVFFunction`与`CFBasicBlockGraph`之间的对应关系
std::vector<const SVFFunction *>	callstack	表示进行符号执行过程中的调用路径信息
ICFG *	icfg	表示被分析程序的过程间控制流图

methods

下图表示SSE类中各个方法之间的调用关系：



initialize(SVFModule *svfModule): void

`initialize`方法完成静态符号执行前的准备工作，其中包括SVFIR和跨过程的控制流图构建，以及指针分析等。该方法在`main`函数中，继于`SVFModule`的构建工作完成之后，以`main`函数中构建的`SVFModule`为其参数被调用。

analyse(): void

`analyse`方法是整个抽象运行状态构建与缺陷分析过程的入口，在`main`函数中，该方法继于`initialize`方法之后被调用。该方法首先遍历`SVFIR`中的所有函数，并为每个函数构建一个`CFBasicBlockGraph`。然后，该方法为每个`CFBasicBlockGraph`构建各个函数控制流图的**弱拓扑序**，用于稍后进行的递归遍历。该弱拓扑序用`CFBasicBlockGWTO`类型表示，该类型为容器类型，提供了对`CFBasicBlockGWTOComp`的iterator。

上述准备工作完成之后，`analyse`方法将进行抽象运行状态的构建与缺陷分析。在该过程中，将首先调用`handleGlobalNode`方法处理`ICFG`中的全局节点，然后识别出`SVFIR`中以`main`命名的函数，将之作为第一个参数调用`handleFunc`方法。`handleFunc`方法将以递归的方式，完成整个`SVFIR`的抽象运行状态构建以及缺陷分析的过程。

svf_assertcheck(): void

handleGlobalNode(): void

处理程序CFG中的全局节点，如`addr`指令等。

handleBranch(const ICFGNode *): void

mergePreBlockES(const CFBasicBlockNode *): void

`mergePreBlockES`方法为处理输入`CFBasicBlockNode`准备好当前的`ExeState`，将其设置为`SVFIR2ExeState`对象的当前ES值。具体而言，有以下两种情况：

1. 如果输入的`CFBasicBlockNode`是某函数的Entry Node，那么由于在处理该函数的callsite时已经将当时的`ExeState`传递给了`handleFunc`方法，并且通过`entryNodeToES`存储了与该函数的Entry Node之间的对应关系，因此可以直接采用该ES作为处理这个输入`CFBasicBlockNode`时的当前ES。
2. 如果输入的`CFBasicBlockNode`是某函数的中间Node，那么直接由该Node的入边为Key，就可以通过`esMap`获取到其所有前继节点的处理完成时的ES，将这些ES进行join操作，即可作为输入Node的当前ES值。

值得注意的是，之所以Entry Node需要做这样的特殊处理，是因为SSE所采用的分析是context sensitive的，而对于函数的Entry Node而言，其入边可能来自不同的callsite，因此必须通过handleFunc进行传递，才能将当前call context的ES值传递给Entry Node。现以下面的例子说明：

```
void foo(int x){
    //foo entry
}

int main(){
    foo(1);  // callsite1
    foo(2);  // callsite2
}
```

在处理callsite1时，ES中x的值为1，而在处理callsite2时，ES中x的值则为2。那么在处理到foo entry时，entry node的入边有两条，分别来自callsite1和callsite2，从而仅仅根据entry node的入边将无法分辨应当采用哪个callsite的ES。而当前的做法则可以解决这一问题，在处理foo函数时，将当前ES通过`handleFunc`方法传递，即可实现context sensitive的特性。

handleBlock(const CFBasicBlockNode *): void

`handleBlock`方法被`handleFunc`方法调用，用于对所输入`CFBasicBlockNode`中包含的`SVFStatement`依此进行处理。处理的内容主要包括两项：符号执行状态的构建以及缺陷探查。特别的，对于缓冲区溢出分析（实现于`SSE`的子类`BufferOverflowChecker`类型中）而言，缺陷探查主要针对`gep`指令进行。

值得注意的是，handleBlock在处理各种`SVFStatement`时，当处理到`CallPE`，`RetPE`，`GepStmt`，`CopyStmt`，`AddrStmt`这五种指令的时候，会将这些指令与指令中所赋值的`SVFVar`建立对应关系，保存在`varDefs`变量中。之所以在此处建立这样的关系，目的是为了后续在处理GepStmt时，能够根据`varDefs`中所存储的，关于`SVFVar`的赋值链条，追溯到`SVFVar`所指向的内存对象的定义处（如alloca处）。

handleCycle(const CFBasicBlockGWTOCycle *): void

`handleCycle`方法被`handleFunc`方法调用，用于对所输入`CFBasicBlockCycle`进行处理。在对循环中所包含的语句进行符号执行之前，首先调用`mergePreBlockES`方法，获得循环执行前一刻的符号执行状态，用`pre_es`变量保存。接下来循环执行以下的步骤：

1. 调用`handleBlock`方法处理循环的head。
2. 比较循环变量`i`和所设置的`widen_delay`参数大小，如果`i<widen_delay`，则更新pre_es为执行完head之后的ES值；否则进行widen delay操作（该操作的详细步骤省略）。
3. 依此对输入`CFBasicBlockGWTOCycle`的循环列表中所包含的`CFBasicBlockGWTONode`和`CFBasicBlockGWTOCycle`对象调用`handleBlock`和`handleCycle`方法进行处理。

上述循环的退出条件为：`pre_es`经过narrowing操作之后的`new_pre_es`之间满足`new_pre_es >= pre_es`。

handleFunc(const SVFFunction *, const IntervalExeState &): void

`handleFunc`方法以某个被分析`SVFIR`中的函数为第一个参数输入，并以整个`SVFIR`的`IntervalExeState`为第二个参数输入。该方法将依次对输入函数中的`CFBasicBlockGWTOComp`进行处理，所依照的顺序是输入函数控制流图的弱拓扑序（已预先在该方法调用前被构建）。处理分为以下两种情况进行：

1. 若`CFBasicBlockGWTOComp`类型的对象实际上归属于`CFBasicBlockGWTONode`子类，那么调用`handleBasicBlock`方法并将其`CFBasicBlockNode`类型成员作为参数传递进行处理；

2. 若对象实际上归属于`CFBasicBlockGWTOCycle`子类，那么调用`handleCycle`方法并将其本身作为参数传递进行处理。

值得注意的是，在`handleFunc`开始处理函数前，会遍历`callstack`，检测当前处理路径中是否已经包含该函数，然后将包含该函数的情形视为递归，直接跳过处理。

SSEAPI

`SSEAPI`类型为SSE中进行符号执行提供公共的utils函数。

getArrayByteSize(u32_t baseExpr): std::vector<u32_t>

`getArrayByteSize`方法的参数是`SVFVarId`，其作用是获取ES中，该`SVFVar`可能指向的`ObjVar`，最终获取该ObjVar的字节大小。例如，对于`int a[10]`以及`int a = (int *)malloc(sizeof(int) * 10)`语句声明的栈数组和堆数组，获取到的数组字节大小是 $4 \times 10 = 40$ Bytes。

Note: 需要注意的是，目前该方法仅适用于获取简单数据结构的列表元素个数，对于双重数组、自定义数据结构等获取到的数组字节大小不精确。

getArrayElemByteSize(u32_t base_addr): std::vector<u32_t>

`getArrayElemByteSize`方法的参数是`SVFVar`ID，其作用是获取ES中，该`SVFVar`可能指向的`ObjVar`，最终获取`ObjVar`所表示的数组元素的字节大小。例如，对于`int a[10]`以及`int a = (int *)malloc(sizeof(int) * 10)`语句声明的栈数组和堆数组，获取到的元素字节大小是4 Bytes。

Note: 需要注意的是，目前该方法仅适用于获取简单数据结构的列表元素个数，对于双重数组、自定义数据结构等获取到的元素字节大小不精确。

getArrayIndexSize(u32_t base_addr): std::vector<u32_t>

`getArrayIndexSize`方法的参数是`SVFVar`ID，其作用是获取ES中，该`SVFVar`可能指向的`ObjVar`，最终获取`ObjVar`所表示的数组的元素个数。例如，对于`int a[10]`以及`int a = (int *)malloc(sizeof(int) * 10)`语句声明的栈数组和堆数组，获取到的元素个数是10个。

Note: 需要注意的是，目前该方法仅适用于获取简单数据结构的列表元素个数，对于双重数组、自定义数据结构等获取到的元素个数不精确。

initFuncMap(): void

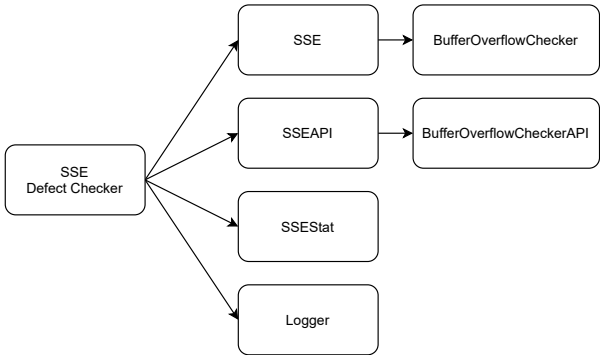
初始化SSE可以处理的外部函数`_func_map`，每个函数名对应一个用来处理该外部函数的SSE函数。

handleExtAPI(const CallICFGNode *call): void

通过`CallStmt`中所调用外部函数的函数名，在`_func_map`中查找处理该函数的SSE函数。若查找成功，则调用该SSE函数来处理该外部函数。

SSE Defect Checker模块设计文档

Note: 本文档关于SSE Defect Checker模块，该模块在SVF-SSE仓库中。该模块中的类型及其继承关系如图所示：



BufferOverflowChecker

`BufferOverflowChecker` 是SSE类型的子类，重写了SSE的 `handleBlock` 方法和 `handleDynMemAlloc` 方法。 `handleBlock` 的重写主要是添加了对 `gep` 语句进行缓冲区溢出检查的逻辑，而 `handleDynMemAlloc` 方法的重写则主要是添加了对分配内存的大小估计和记录逻辑。

handleBlock(const CFBasicBlockNode* block): void

`handleBlock` 方法总体上与父类中的该方法保持一致，不同之处在于:

1. 在处理 `GepStmt` 的时候，在完成该指令的符号执行以后，将额外调用 `BufferOverFlowCheckerAPI` 中的 `checkOffsetValid` 方法，并将 `GepStmt` 所对应的 `SVFInstruction` 作为第一个参数传递，对该指令所期望获取的内存对象的地址进行溢出检测。
2. 在处理 `CallICFGNode` 的时候，检测其中的外部函数调用，如 `memcpy` 等与内存操作有关的外部函数，并且调用 `BufferOverFlowCheckerAPI` 中的 `handleExtAPI` 方法来对外部函数进行溢出检测。

handleDynMemAlloc(const AddrStmt *addr): void

`handleDynMemAlloc` 方法用于在动态分配内存空间时，为 `MemObj` 对象设置其数组元素个数。例如，在处理语句 `%1 = alloca i32, %2` 时，由于 `%2` 的值不能从指令中立即获取，因此需要在进行符号执行得到 `%2` 的可能值后，再另行设置 `MemObj` 对象的元素个数，通过调用此方法即可完成上述操作。

BufferOverflowCheckerAPI

`BufferOverflowCheckerAPI` 是 `SSEAPI` 的子类型，为BufferOverflowChecker中进行缓冲区溢出检测提供公共的utils函数。

checkOffsetValid(const SVFValue* value, const IntervalValue& len): bool

`checkOffsetValid` 方法在每一处内存访问的现场被调用，并传递一个表示指针的 `SVFValue` 。该方法的作用是：检查对指针所指的内存对象进行大小为 `len` 的内存访问是否超出边界。其第二个参数 `len` 表示以该 `GepStmt` 所取的内存空间为访问地址，所访问的内存空间的字节大小，如 `*(T *)ptr` 所访问的内存大小就是 `sizeof(T)` 。

`checkOffsetValid` 基于以下原理：某个内存对象从定义处（如alloca）到最终的使用处（如作为load指令的第一个操作数，或者 `memcpy` 调用的第一个参数），其ptr会经过若干次的 `GepStmt` 取偏移、`CallPE` , `RetPE` 参数传递、以及 `load` , `store` 操作等等。而为了判断内存访问是否溢出，需要估算出三个信息：内存空间分配的总字节大小，经过若干次 `GepStmt` 所产生的**累计偏移大小**，以及准备访问的字节大小。

准备访问的字节大小可以直接从访问现场的指令获得，例如访问现场 `getelementptr inbounds [10 x i32], [10 x i32]* %1, i32 0, i32 1` 的字节偏移大小的计算式为 $0 \times sizeof([10 \times i32]) + 1 \times sizeof(i32) = 4$。而内存空间分配的总字节大小以及经过 `GepStmt` 所产生的**累计偏移大小**则需要通过更加复杂的计算过程获取。以前述的Gep指令为例，其中指针 `%1` 可能的来

源如下：

LLVM IR	说明
`call void foo(%3)`	parameter passing
`%1 = getelementptr inbounds [10 x [10 x i32]], [10 x [10 x i32]]* %i, i32 0, i32 2`	multiple offsets by gep
`%1 = load i32*, i32** %3`	pointer type load stores
`%1 = bitcast i8* %3 to i32*`	type cast

为了处理上述的情形，SSE会在符号执行过程中，记录下的指针变量的定义信息，保存在`BufferOverflowCheckerAPI`的`vardefs`变量中。记录指针变量定义信息的算法在`handleBlock`函数中实现，算法的伪代码如下：

```
# Psudo code: tracking offset chain while performing symbolic execution
vardefs = {}  # map from ptr to its latest def site

def handleBlock():
    for instruction in block:
        if instruction is address statement:
            vardefs[instruction left hand side] = instruction
        else if instruction is gep statement:
            vardefs[instruction left hand side] = instruction
        else if instruction is store statement:
            vardefs[instruction left hand side] = vardefs[instruction right hand
side]
        else if instruction is load statement:
            vardefs[instruction left hand side] = vardefs[instruction right hand
side]
        # ...
```

上述算法记录的`vardefs`信息能够被`checkOffsetValid`方法利用，从而计算出内存空间分配的总字节大小，以及经过若干次`GepStmt`所产生的**累计偏移大小**。计算算法在`checkOffsetValid`方法中实现，其伪代码如下：

```
# Psudo code: checking algorithm
def checkOffsetValid(pointer, offset):
    previous_total_offset = 0
    memory_size = 0
    present_pointer = pointer

    # calculating total_offset and memory_size
    while present_pointer in vardefs:
        if vardefs[present_pointer] is gep statement:
            previous_total_offset += gep_offset
        else if vardefs[present_pointer] is address statement:
            memory_size = alloca size
        else:
            present_pointer = vardefs[present_pointer] right hand side
```

```
    # deciding if access out of bound?
    if total_offset + offset > memory_size:
        # arouse error
    else:
        # safe
```

Example：以下面的程序为例，解释`checkOffsetValid`方法的详细过程：

```
void foo(char *charArr){
    charArr[10] = 'x';  // 第二处
    charArr[40] = 'x';
}

int main(){
    int a[10];
    foo((char *)(a+1));
}
```

该程序翻译为LLVM IR为（clang -O1）：

```
define dso_local void @_Z3fooPc(i8* nocapture) local_unnamed_addr #0 {
  %2 = getelementptr inbounds i8, i8* %0, i32 10
  store i8 120, i8* %2, align 1, !tbaa !4
  %3 = getelementptr inbounds i8, i8* %0, i32 40
  store i8 120, i8* %3, align 1, !tbaa !4
  ret void
}

define dso_local i32 @main() local_unnamed_addr #1 {
  %1 = alloca [10 x i32], align 4
  %2 = bitcast [10 x i32]* %1 to i8*
  call void @llvm.lifetime.start.p0i8(i64 40, i8* nonnull %2) #3
  %3 = getelementptr inbounds [10 x i32], [10 x i32]* %1, i32 0, i32 1
  %4 = bitcast i32* %3 to i8*
  call void @_Z3fooPc(i8* nonnull %4)
  call void @llvm.lifetime.end.p0i8(i64 40, i8* nonnull %2) #3
  ret i32 0
}
```

`%1`所指向的，即分配的`int a[10]`的内存空间首地址，该内存空间大小为40 Bytes。SSE对`main`和`foo`函数中三处`getelementptr`指令进行缓冲区溢出检测。

现以第二处`gep`指令为例，说明`checkOffsetValid`方法进行检测的具体步骤：

1. 调用`checkOffsetValid`，并传递`GepStmt`和`IntervalVal`(1,1)，进入到checkOffsetValid方法，total_offset初始化为(1, 1)。
2. 开始处理语句`%2 = getelementptr inbounds i8, i8* %0, i32 10`，获取`%0`的定义处，得到`CallPE`语句，从而直接跳转到`CallPE`的RHS即`%4`。
3. 获取`%4`的定义处，得到`%4 = bitcast i32* %3 to i8*`，直接跳转到`%3`。
4. 获取`%3`的定义处，得到`%3 = getelementptr inbounds [10 x i32], [10 x i32]* %1, i32 0, i32 1`，跳转到%1，并且累加字节偏移量4到total_offset。
5. 获取`%1`的定义处，得到`%2 = bitcast [10 x i32]* %1 to i8*`，直接跳转到`%1`。
6. 获取`%1`的定义出，得到`%1 = alloca [10 x i32], align 4`，该指令为内存对象的定义指令，因此可以获取到内存对象的字节大小，即40 Bytes。然后调用`getGepByteOffset`指令，获取字节

偏移量`%2 = getelementptr inbounds i8, i8* %0, i32 10`，为(10, 10)，累加到total_offset上，最终得到total_offset为(15, 15)。通过`15>40`为假可以判断，此处不存在缓冲区溢出。

目前`checkOffsetValid`方法的实现只能对单链传递的指针值进行追溯，即未考虑`load`，`store`以及`phi`指令对指针值的影响，从而无法追溯指针可能指向的多个内存对象。

getGepByteOffset(const GepStmt* gep): IntervalValue

输入`GepStmt`，获取并返回该`GepStmt`的字节偏移增量。例如，对于指令`%3 = getelementptr inbounds [10 x i32], [10 x i32]* %1, i32 0, i32 %2`，可以通过程序在该点处的`InvervalExeState`，获取`%2`的`IntervalValue`（假设为 $[1.0, 2.0]$ ），从而进一步推知该指令的字节偏移量为：

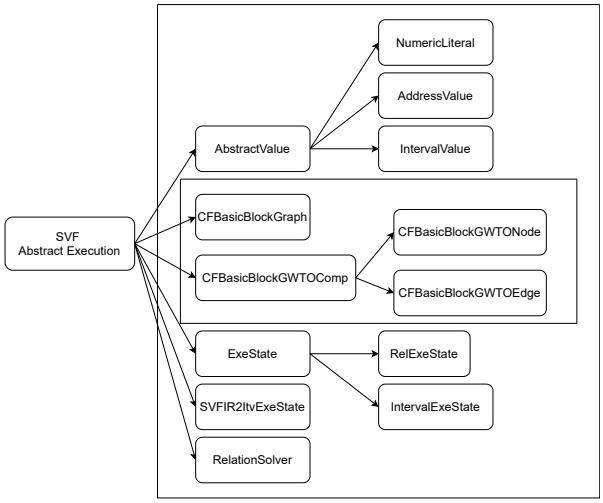
$$0 \times sizeof([10 \times i32]) + [1.0, 2.0] \times sizeof(i32) = [4.0, 8.0]$$

initFuncMap(): void

初始化BufferOverflowChecker可以处理的外部函数_func_map，每个函数名对应一个用来处理该外部函数的BufferOverflowChecker函数。

SVF Abstract Execution模块API文档

Note: 本文档内容关于`SVF`项目`AbstractExecution`模块的API及其使用。模块的头文件在`SVF/svf/include/AbstractExecution`与`SVF/svf/include/Graph`目录下，模块的源文件在`SVF/svf/lib/AbstractExecution`与`SVF/svf/lib/Graph`目录下。模块的类型及继承关系如图：



Part 1

AbstractValue

`AbstractValue`类型表示符号执行过程中，某变量`SVFVar`的可行域。可行域可以为实数域、区间域，也可以为虚拟地址，分别对应于`AbstractValue`的子类型`NumericLiteral`，`IntervalValue`和`AddressValue`。

NumericLiteral

`NumericLiteral` 类型表示实数域，在其内部使用双精度浮点数表示实数。值得注意的是，在SSE中，并不直接使用 `NumericLiteral` 来表示 `SVFVar` / `ObjVar`，而使用一个 `IntervalValue` 表示SVF变量的状态。

方法声明	返回类型	功能
getNumeral() const	double	获取该对象表示的实数值

AddressValue

`AddressValue` 类型表示指针指向的地址集合。由于一个指针可能指向多个地址，因此该类型为可迭代类型，提供iterator对集合内的地址值进行访问。

方法声明	返回类型	功能
getInternalID(u32_t idx)	u32_t	输入AddressValue中的一个虚拟地址值，返回该虚拟地址在SVFIR中对应的 `ObjVar` Id

IntervalValue

`IntervalValue` 类型表示区间域，如 $[1.0, 2.0]$，其中用两个 `NumericLiteral` 成员分别表示区间的下界和上界。在SSE中，使用一个 `IntervalValue` 表示SVF变量的状态，例如在执行完 `x = 1` 语句后，x所对应的变量可以使用一个上、下界均为 1.0 的 `IntervalValue` 类型对象表示，即表示 $x \in [1.0, 1.0]$。

方法声明	返回类型	功能
lb() const	NumericLiteral &	获取区间下界
ub() const	NumericLiteral &	获取区间上界

Part 2

ExeState

`ExeState` 类型表示程序在某个程序点处的符号执行状态，如 `SVFVar` 的 `Vaddrs` 等信息。

方法声明	返回类型	功能
&operator=(const ExeState &rhs)	ExeState	判断两个执行状态是否相同
joinWith(const ExeState &other)	void	
meetWith(const ExeState &other)	void	
getVAddrs(u32_t id)	VAddrs &	输入SVFVar ID，返回该SVFVar的虚拟地址值

IntervalExeState

`InvtervalExeState`是`ExeState`类型的子类型，表示程序某变量在某程序点处的间隔符号执行状态，比如`SVFVar`或者`ObjVar`的`IntervalValue`等信息。例如，在执行完语句`x = 1`之后，会将变量x所对应`ObjVar`的执行状态变成$[1.0, 1.0]$，其对应关系保存在`IntervalExeState`的`Map _locToItvVal`中。

方法声明	返回类型	功能
operator>=(const IntervalExeState &rhs)	bool	判断两个IntervalExeState之间的关系
bottom()	IntervalExeState	
top()	IntervalExeState	
has_bottom()	bool	

Part 3

CFBasicBlockGWTO

`CFBasicBlockGWTO`类型表示`CFBasicBlockGraph`（即各个函数的控制流基本块图）的**弱拓扑序**。该类型为线性结构的容器类型，容器元素的类型为`CFBasicBlockWTOComp`，`CFBasicBlockGWTO`提供itorator以实现对容器内`CFBasicBlockGWTOComp`的访问。

CFBasicBlockGWTOComp

`CFBasicBlockGWTOComp`类型是`CFBasicBlockGWTONode`和`CFBasicBlockGWTOEdge`类型的基类型，用以表示`CFBasicBlockGWTO`容器元素。其中，comp是component的缩写。

CFBasicBlockGWTONode

`CFBasicBlockGWTONode`类型表示控制流基本块图中的普通节点（即不在循环中的节点），每个该类型的对象对应一个`CFBasicBlockNode`类型的对象。

方法声明	返回类型	功能
node() const	CFBasicBlockNode *	获取该对象对应的一个`CFBasicBlockNode`对象

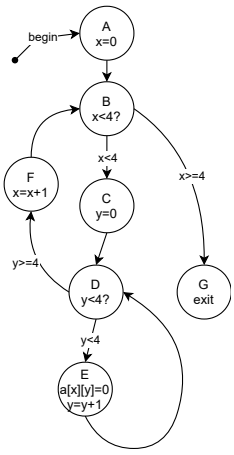
CFBasicBlockGWTOCycle

`CFBasicBlockGWTOCycle`类型表示控制流基本块图中的循环，每个该类型对象对应于图中的一个自然循环，因此包含一个`CFBasicBlockWTOComp`类型的列表成员，以对循环做线性化表示。此外，该类型还包含一个`CFBasicBlockNode *`类型成员指向循环的head（区别于前述列表的第一个元素），通过该类型的`head`方法可获取该成员。`CFBasicBlockGWTOCycle`为容器类型，提供iterator以实现对循环线性化列表中`CFBasicBlockWTOComp`元素的顺序访问。

以一个双重循环为例，说明该类型如何表示循环，程序代码如下：

```
int main() {
    int a[3][4];
    for(int x = 0; x < 4; x++) {
        for(int y = 0; y < 4; y++) {
            a[x][y] = 0; //TP, x index too large
        }
    }
}
```

上述程序可以表示为下图中的控制流基本块图：



若将上述程序中的外层循环和内层循环分别表示为`CFBasicBlockGWTOCycle`类型的cycle1和cycle2。则对于cycle1而言，表示基本块B的`CFBasicBlockGWTONode`对象即为该循环的head。cycle1的基本块表内容为：$(C, cycle2, F)$。在基本块B中，往往包含一个分支语句，用于控制循环终止条件。

Part 4

SVFIR2ExeState

`SVFIR2ExeState`类型用于维护符号执行状态，其中包含两个符号执行状态，分别为`RelExeState`和`IntervalExeState`类型。该类型提供`translatexx`方法用于输入一条语句，并根据规则更新符号执行状态。

方法声明	返回类型	功能
setEs(const IntervalExeState &es)	void	将某个es设置为当前需要处理的es，后续所有的translatexx操作都将基于该es进行
getEs()	IntervalExeState &	获取当前的es值
translatexx(SVFStatement *)	void	基于当前的es内容，执行该SVFStatement，并更新es
getInternalID(u32_t idx)	u32_t	输入AddressValue中的一个虚拟地址值，返回该虚拟地址在SVFIR中对应的`ObjVar`Id

Part 5

Note: 本部分内容的头文件和源码分别位于`SVF/svf/include/Graph`和`SVF/svf/lib/Graph`目录下。

CFBasicBlockGraph

`CFBasicBlockGraph`类型表示某个函数的控制流基本块图，根据该函数的控制流图（CFG，即ICFG中表示该函数的子图）所构建。控制流基本块图的节点用`CFBasicBlockNode`类型表示，边用`CFBasicBlockEdge`类型表示。

CFBasicBlockNode

表示控制流基本块图中的一个基本块，例如在上述的例子中，基本块E就对应一个`CFBasicBlockNode`，该`CFBasicBlockNode`包含两个`ICFGNode`。`CFBasicBlockNode`类型为容器类型，提供iterator对基本块中包含的`ICFGNode`进行顺序访问。

CFBasicBlockEdge

表示控制流基本块图中基本块之间的边。