基于词法分析的代码漏洞模式识别

摘要

软件技术与社会生活的方方面面越来越紧密，软件开发又不可避免的产生各种漏洞，而漏洞识别与定位十分耗费人力物力。如何快速识别并定位漏洞以提升软件运行的稳定与安全成为越来越严峻的问题。随着深度学习的发展，出现了一些可快速自动化的识别软件漏洞的方法，譬如基于代码抽象语法树（以下简称AST）或程序数据流图(以下简称PDG)的漏洞识别方法，从AST或PDG中提取漏洞特征进行模式识别，但有些代码语义譬如通过AST进行抽象后会消失，不利于漏洞的识别。本文提出一种基于词法分析的代码漏洞特征提取方法，以利用更广的语义依赖进行漏洞识别。

关键字：漏洞识别，词法分析，抽象语法树，程序数据流，深度学习

1 引言

    软件漏洞与软件开发相伴相生。由于软件规模的不断扩大，导致软件复杂度也不断变高，兼之开发人员对软件开发技术熟练程度、对开发逻辑理解等存在差异，不可避免的在软件开发过程中不自觉的引入各种漏洞（业界也称为“Bug”），而且随着业务的迭代，老旧的程序代码可能不适应新业务的需求发展，也导致出现各种漏洞。

    漏洞是潜伏在软件系统中的，发现这些各种各样的漏洞通常是一种被动的行为，一般在软件运行期时系统出现问题了，漏洞才会被开发人员识别并修复，这使得维护软件运行的稳定性相对滞后。而且如果软件系统复杂性很高，开发人员识别漏洞的时间也可能相对变长，对开发人员的技术水平要求也可能相对提高，从而使得漏洞识别是一件十分耗费人力的事。

    其次，已经有一些静态的漏洞分析工具可以帮助开发人员较快的识别漏洞。如 Clang Static Analyzer[[1]](#footnote-1)，这些工具一般是通过人工预设的漏洞语义判断逻辑，譬如：如果一个对象分配方法与其释放方法要成对调用，否则就判断代码片段有内存泄漏漏洞。这要求静态分析工具要随漏洞语义的变化而不断更新其的判断逻辑，十分耗费物力财力。而且有些漏洞要在软件运行期才有可能表现出来，静态分析工具无法动态识别漏洞，覆盖率低，导致很容易出现漏报或误报的情况。

    2016年，Zhen Li等提出了称为“VulPecker”[1]的自动识别系统漏洞的方法，基于代码克隆技术，利用代码相似性从源代码中检测漏洞。但这些方法本质还是通过静态分析方法预先抽取已知的漏洞特征，通过相似性比较来检测代码是否有漏洞，但不能自动提抽取代码特征来识别新的漏洞。2018年，Zhen Li等又先后提出了VulDeePecker[2] 和SySeVR[3] 两个利用机器学习可自动识别漏洞的方案，其系统的主要思想是先通过AST找出可以可疑漏洞点（变量或函数方法），然后找出与漏洞点语义相关的语句进行训练学习，其模型的效果有不错的漏洞低误报率和低漏报率，相比现有的静态分析工具有漏洞识别成功率有很大提升。但其可疑漏洞点的假设仍然离不开静态的判断规则，人工假设性过强。Aram Hovsepyan[4] 等基于词袋模型（bag-of-word）将其Java代码进行编码，然后用支持向量机自动进行代码段的漏洞识别，但其训练与测评方法只局限于单个数据集，算法通用性与泛化能力有待考量。Yulei Pang[5] 等在此基础上，使用N-gram模型对代码片段进行编码，然后也使用支持向量机自动进行代码漏洞识别，获得不错的性能。Jón Arnar Briem[6] 等将AST的结点编码为向量，然后输入到神经网络进行漏洞识别学习，得益于AST能比较好的抽象出程序代码元素间的相互依赖关系，此模型对漏洞的识别率比较高，但其只提供一种验证方案，无法考虑其算法通用性。Fen Hantao[7] 等也对基于AST的漏洞识别方法进行研究，使用Bi-GRU作为主要的模型架构。还有张启航[8] 同样也是提出了基于AST的漏洞识别方案，其主要区别是没使用AST的全部结点对代码进行编码，而只选取了变量、方法名和程序控制逻辑结点，一定程序度减轻了这类基于AST编码方案的复杂度，且使用GPT和Bi-GRU作为漏洞特征的抽取模型架构，增加了代码内部各元素对于其漏洞语义的注意力因素，对漏洞识别率的提升也有很好的帮助。  
 本文的主要工作是提出基于词法分析的漏洞特征提取方法，以从更广为的语义依赖范围进行漏洞模式识别，力求提高漏洞识别的准确率。

2 研究方法

2.1代码编码方法

漏洞识别的核心问题就是如何将代码编码为语义相关的向量。

首要问题是如何选择研究对象的粒度。具体到代码研究，考虑到以代码文件为单位的话，每个样本的代码元素将可能十分巨大。而如果以字符级别元素为单位，可能出现相同字符串表示不同语义的问题。本文认为函数粒度为单位比较适合，即一个函数为一个样本，理由为：（1）函数通常是只完成一个功能，是一群语义相近的代码语句集合，可以形成一个特定语义的闭包。（2）函数包含的代码元素一般不会太多，编码效率会比较高。

第二个问题是抽取代码元素间的依赖关系。当前漏洞识别方法也多使用以AST节点作为代码元素，甚至仅选取变量类型和方法类型的节点作为代码元素。虽然AST可以一定程度的反映代码元素间的依赖关系， 但AST会把代码元素的组织架构去掉，而有些漏洞在代码原有结构中才比较容易看出来，譬如offset by one error、递归中忘记终结条件，等。本文将使用的全量代码元素对代码进行编码，以解决这种将代码抽象后结构缺失后的问题。编码过程如下：（1）因为用户自定义的标识符一般出现的频率较少，而且对于不同软件项目，标识符的命名方式、代码的编写风格不统一， 如果都分别编码，将可能引起过多权重很小的参数，影响模型识别效果。为此，本文将用户自定义的变量名、非指针型的变量类型、指针型的变量类型和函数名分别替换为“hoho\_var”、“hoho\_var\_type”、“hoho\_pt\_type”和“hoho\_func”4种固定的通配符，如图1操作：

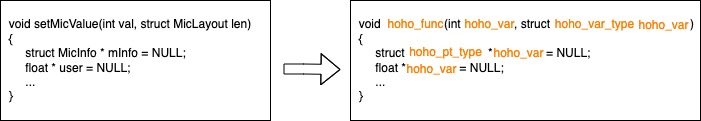


图1 代码标识符替换为通配符

（2）使用编译器对代码样本进行词法分析，即可将连续的代码语句切分为一个个词素，形容词素列表。本文使用的数据集是C语言代码数据集，选用Clang作为词法分析器，譬如对图2代码段进行切分：



图2 代码切分前



图3 代码切分后

可得到图3切分结果。（3）使用当前比较流行word2vec[9]词嵌入方法，它是基于分布式表示的思想，可以反映不同代码元素的在特征空间的分布，从而表示出它们的相关程度。用此方法将每个划分出来的词素编码为数值，形成数值型向量表示。

2.2 模型基本架构

本文采用TextCNN[10]网络架构进行模型的训练。它借鉴了CNN[11]技术在图像领域中的成功经验，譬如可以共享网络权重，可以并行进行卷积运算，等，将CNN运用在语言处理中，区别是不像图像处理中的CNN是横向纵向两个维度做卷积运算，而TextCNN只在一个维（纵向）做卷积操作，这要求卷积核的宽度必须等于经过word2vec之后词嵌入的维度。如图4所示。

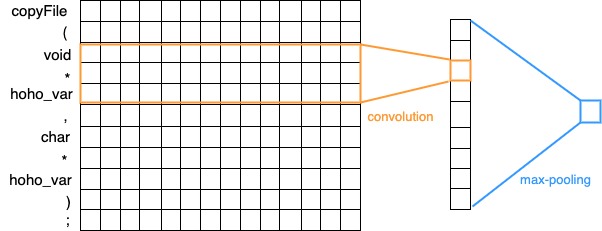


图4 TextCNN网络基本结构

具体到漏洞识别来说，将词向量纵向堆叠后，可分别与不同尺寸的卷积核进行卷积运算，再将运算结果进行max-pooling操作，将结果堆叠拉直为1维向量，再输入到全连接网络进行分类识别。

3 实验

3.1 数据预处理

本文使用的漏洞识别数据集来自于microsoft的CodeXGLUE其中的“code-code”漏洞数据集，每条样本包含：所来自的软件项目名、提交哈希值、标注和函数定义代码段，一共27296条样本数据，每条样本分别有0（有漏洞）和1（无漏洞）标注。本文将其中80%作为训练集，剩余20%作为测试集。

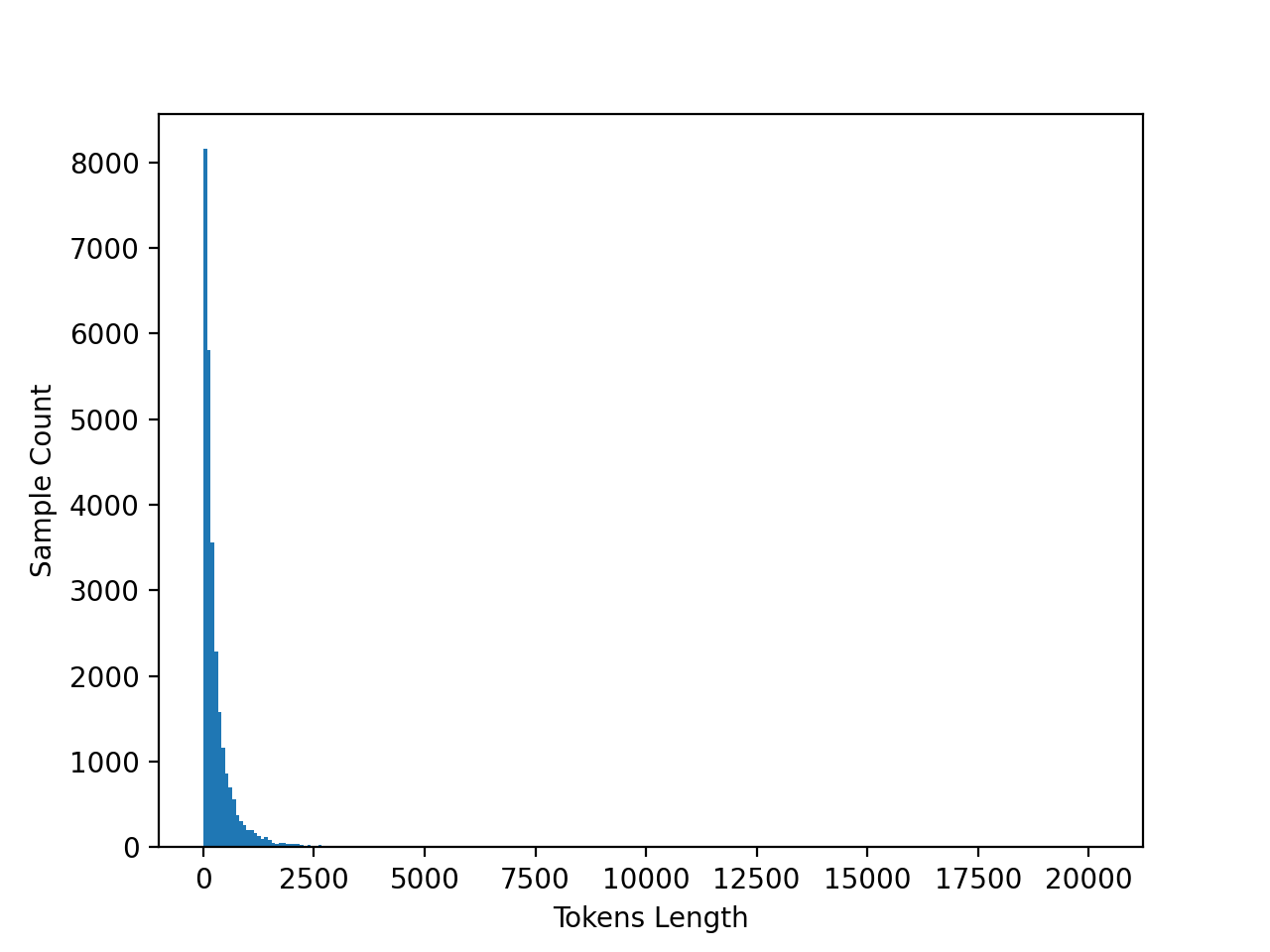


图5 数据集样本词素数量分布

每条样本的词素列表长度分布如图5所示。可见大部分样本包含代码词素的数量为2500以下。故本文以2000作为样本最大的词素数量。对数据进行预处理时，若每条样本代码词素数量超过2000，则进行截断至2000大小，否则，则对样本进行padding处理：用特殊标识符“<pad>”填充至2000长度。

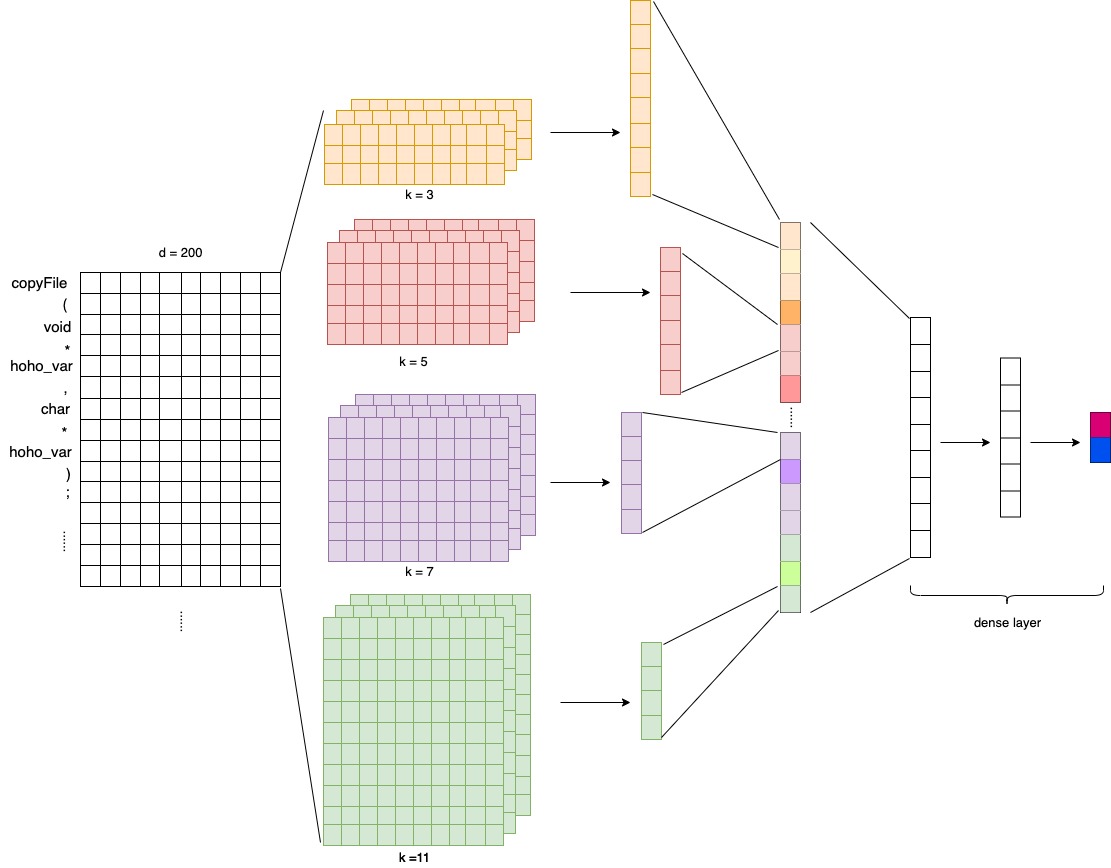


图6 漏洞识别流程网络架构

3.2 模型细节

漏洞识别分类的整个模型架构如图6所示。

（1）输入层，代码词素列表经过embedding层后，编码成200维代码向量，再将每一个词素纵向堆叠，使得每个向量表示为2000x200的词嵌入矩阵。

（2）卷积层，为了尽量抽取更多的词素依赖关系，本文选用4种尺寸大小卷积核，设置长度为3、5、7、11，分别与词嵌入矩阵进行卷积运算。将各个卷积核输出结果进行堆叠，输出形成1x400的特征向量。这里还会使用dropout[12]方法，设置dropout率为50%，以防止模型过拟合。

（3）全连接层。这里设置两个隐藏层，第一个隐藏层大小即为以上卷积层输出的特征向量大小（400），后再接一个大小为64的全连接层。

（4） 输出层大小为2，分别对应两个类别（有漏洞或无漏洞），最后使用softmax函数计算两个类别的概率。

     本模型采用预测分类与输入分类标记的交叉熵作为损失函数，并使用Adam[13]算法作为模型的优化算法。

3.3 实验结果

    在模型训练完成后，会自动得到各代码元素与其对应的词嵌入向量，其表征了代码元素在几何空间的位置。语义相近的代码向量在几何空间中具有更近的距离。因此可以通过测试某些代码元素对应的向量的距离大小，并对比这些代码元素的现实含义，来验证这种代码编码方法的有效性。以下随机选出若干代码元素，如数据类型标识符、函数名、控制流程关键字等，查看与其距离最近有哪些代码元素。这里衡量距离大小使用余弦相似度计算。如图7所示（图7：代码特征有效性评估），左边栏是待评估的代码元素，右边栏列出了与其距离最近的前5个代码元素，结果符合预期，即具有相似语义的代码，其在几何空间的距离也更接近。

为了验证本文的漏洞识别模型效果，本文将Fen Hantao[7]等的基于AST并使用Bi-GRU提取漏洞特征的方法做比较。GRU也称为门控循环神经网络（Gated Recurrent Unit），而Bi-GRU即为双向门控循环神经网络的。由于Fen Hantao等其论文没有提供相关代码，本文按照其研究方法编写了对应的模型训练代码。图8是本文使用全量代码元素并使用TextCNN的模型训练与测试结果（图8），图9是基于AST并使用Bi-GRU的模型（图9），两者都用相同的数集据和相同划分的训练集与测试集进行训练与测试。两者在训练集上的准确率差别不大，而在测试集上的准确率，TextCNN要略优于Bi-GRU。两种模型的测试准确率要明显低于训练准确率，模型都过拟合，可能是由于模型结构比较复杂，还需要加强正则化力度。

（这里插一个表1：两种模型训练和测试准确度对比）

本文也使用精确模型精确率、召回率和F1值，MCC值衡量性能。精确率（Precision Rate）表示模型预测为正例的样本中有多少实际为正例的：（小插图PR）。召回率（Recall Rate）表示实际为正例的样本中有多少是被模型正确预测到的：（小插图RR）。F1即为精确率和召回率的平均值，计算方式为：（小插图F1）。MMC描述了实际分类与预测分类间的相关系数，取值范围为[-1, 1]，1表示完美预测，-1表示实际与预测完全不一致，0表示预测结果还不如随机，计算方式为：（小插图MMC）。表1展示了TextCNN和Bi-GRU两种模型在进行漏洞识别时以上各种评价标准的表现情况：（插表1）

综合来看，使用全局代码元素与TextCNN的表现要略优于使用AST与Bi-GRU，分析原因为：（1）使用全局代码元素比仅使用AST某些节点进行漏洞模式识时更能捕获代码间的语义。（2）TextCNN模型参数比Bi-GRU更少，加上max-pooling方法的使用，TextCNN可使代码向量表示保留主要特征，模型结构相对不那么复杂，训练速度更快，算法收敛得更快，所以使用TextCNN的效果相对较好。

**参考文献**

[1] Zhen Li,Deqing Zou,Shouhuai Xu, et al. Vulpecker: an automated vulnerability detection system based on code similarity analysis[Z], 2016.

[2] Zhen Li,Deqing Zou,Shouhuai Xu, et al. VulDeePecker: A Deep Learning-Based System for Vulnerability Detection[Z], 2018.

[3] Zhen Li,Deqing Zou,Shouhuai Xu, et al. SySeVR: A Framework for Using Deep Learning to Detect Software Vulnerabilities[Z], 2018.

[4] Aram Hovsepyan,Riccardo Scandariato,Wouter Joosen, et al. Software vulnerability prediction using text analysis techniques[Z], 2012.

[5] Yulei Pang,Xiaozhen Xue,Akbar Siami Namin. Predicting vulnerable software components through n-gram analysis and statistical feature selection[Z], 2015.

[6] Jón Arnar Briem,Jordi Smit,Hendrig Sellik, et al. Using Distributed Representation of Code for Bug Detection[Z], 2019.

[7] Hantao Feng,Xiaotong Fu,Hongyu Sun, et al. Efficient Vulnerability Detection based on abstract syntax tree and Deep Learning[Z], 2020.

[8] 张启航. 基于抽象语法树的代码缺陷检测技术设计与实现[D], 2020.

[9] Tomas Mikolov,Kai Chen,Greg Corrado, et al. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space[Z], 2013.

[10] Yoon Kim. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification[Z], 2014.

[11] Y. LeCun,B. Boser,J. S. Denker, et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition[Z]: Mit Press, 1989.

1. https://clang-analyzer.llvm.org/ [↑](#footnote-ref-1)