

Università degli studi di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Adversarial Machine Learning per il Rilevamento di Botnet

Relatore:
Prof. Michele Colajanni

Candidato:
Alessandro Aleotti

Correlatore:
Ing. Mirco Marchetti

Anno Accademico 2017/2018

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Citazioni	2
1.2	Oggetti float	2
1.2.1	Figure	2
1.2.2	Tabelle	3
1.3	Compilazione	3
2	Stato dell'arte	4
3	Progetto	5
3.1	Classificatore Random Forest	5
3.1.1	Dataset	6
3.1.2	Features	6
3.1.3	Output	8
3.2	Classificatore Neurale	8
3.2.1	Input	8
3.2.2	Architettura	9
3.2.3	Output	10
3.2.4	Realizzazione Adversarial Learning	11
3.3	Autoencoder	12
3.3.1	Dataset Autoencoder	12
3.3.2	Architettura Autoencoder	13
3.4	Generative Adversarial Network	15
3.4.1	Output	15

4	Implementazione	16
4.1	Classificatore Random Forest	16
4.1.1	Input	17
4.1.2	Composizione Interna	17
4.1.3	Output	17
4.2	Classificatore Neurale	17
4.2.1	Input	17
4.2.2	Composizione Interna	17
4.2.3	Output	17
4.3	Realizzazione Adversarial Learning	17
4.3.1	Input	17
4.3.2	Composizione Interna	17
4.3.3	Output	17
5	Risultati	18
6	Conclusioni	19

Todo list

indicare SVM e GNB solo nei risultati?	5
famiglie malware	6
mostrare tabella esempio diversi DGA	6
descrivere distribuzione caratteri Alexa vs dga	6
ampliare questa sezione e chiedere a Marchetti	8
indicare il capitolo coi risultati di Random Forest	8
mostrare esempio supobox	8
????????????????????	8
aggiungere ed estendere la teoria MLP nel capitolo precedente?	9
inserire grafo ReLU	9
inserire grafo sigmoid	10
come ampliare????????????????	11
inserire tabella di esempio.	13
ottenere i parametri di randomforest del miglior risultato	16
differenze pratiche tra RF, SVM, GNB	16

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo si propongono degli esempi per gli oggetti utilizzati più di frequente in latex: la Sezione 1.1 descrive come scrivere citazioni, la Sezione 1.2 propone degli esempi di oggetti float, la Sezione 1.3 descrive come compilare questo documento.

1.1 Citazioni

Inserisco qualche citazione per mostrare la bibliografia. Per gli articoli accademici è quasi sempre possibile reperire i blocchi da inserire nel file bib da scholar, come ad esempio. Scholar in questo caso è una risorsa/sito online e per questo. Precediamo le citazione da uno spazio indivisibile tramite il carattere \sim .

1.2 Oggetti float

Nella Sezione 1.2.1 si propone un esempio di figura float, mentre nella Sezione 1.2.2 si propone un esempio di tabella float.

1.2.1 Figure

La Figura 1.1 è un esempio di figura float.

EXAMPLE

Figura 1.1: Esempio di figura float in latex.

1.2.2 Tabelle

La Tabella 1.1 è un esempio di tabella.

allineamento centrale	allineamento a sinistra	allineamento a destra
centrale	sinistra	destra

Tabella 1.1: Esempio di tabella float in latex.

1.3 Compilazione

Di seguito il codice da utilizzare per generare il pdf:

```
1 $ pdflatex main.tex
2 $ bibtex main.aux
3 $ pdflatex main.tex
4 $ pdflatex main.tex
```

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo si propongono degli esempi per gli oggetti utilizzati più di frequente in latex: la Sezione 1.1 descrive come scrivere citazioni, la Sezione 1.2 propone degli esempi di oggetti float, la Sezione 1.3 descrive come compilare questo documento.

Capitolo 3

Progetto

In questo capitolo si propone il progetto realizzato per raggiungere gli obiettivi preposti: si è partiti dalla realizzazione di un classificatore basato su *Random Forest* per poi passare ad una versione più elaborata, utilizzando un *Multilayer Perceptron*. Il passo successivo ha riguardato la creazione di una *Generative Adversarial Network* a partire da un *Autoencoder* in grado di rafforzare un classificatore generando domini sintetici

3.1 Classificatore Random Forest

La prima fase di questo studio è stata quella di implementare un classificatore in grado di separare efficacemente domini *DGA* da domini non malevoli basandosi unicamente sulle caratteristiche linguistiche dei domini: infatti, ad un esame preliminare, i domini *DGA* presentano caratteristiche ben differenti da semplici frasi o parole che solitamente compongono i domini reali.

Si è scelto di utilizzare Random Forest in quanto ritenuto il più adatto al caso in esame. L'algoritmo è stato inoltre messo a confronto con *Support Vector Machine* e *Naive-Bayes*.

All'interno del classificatore *Random Forest* [?], ogni albero dell'insieme è costruito a partire da un campione estratto con sostituzione dal *training set*. In aggiunta, al momento della divisione del nodo durante la costruzione di un albero, la divisione scelta non è più la migliore soluzione tra tutte le *features*. Al suo posto, la divisione che

indicare

SVM

e

GNB

solo

nei

risul-

tati?

viene scelta è la migliore divisione all'interno di un *subset* casuale tra tutte le *features*. Come risultato di questa casualità, il *bias* della foresta di solito aumenta leggermente (rispetto al *bias* di un singolo albero non casuale) ma, a causa della media, la sua varianza diminuisce, di solito compensando l'aumento di *bias*, quindi dando un modello generale migliore.

3.1.1 Dataset

I *dataset* di *training* e *testing* sono stati ricavati due fonti differenti: per quel che riguarda i domini reali si è fatto riferimento alla classifica dei domini più visitati al mondo fornita da *Alexa Internet Inc.* [1], per un totale di 1 milione di siti realmente esistenti; mentre grazie al repository fornito da [2] è stato possibile ottenere un *dataset* esaustivo di esempi *DGA* da diverse famiglie di *malware*. In particolare le famiglie di malware utilizzate per il training sono state:

A partire da tale *dataset* combinato si è proceduto alla creazione di un classificatore binario che fosse in grado di distinguere domini reali da domini generati algoritmicamente.

Il passo seguente stato creare una serie di *features* che fossero in grado di descrivere le caratteristiche linguistiche dei domini presi in esame.

Per raggiungere tale obiettivo si è fatto riferimento a ricerche già esistenti: [3] [4] [5] [6]. Di seguito viene illustrato l'insieme di tali *features*:

3.1.2 Features

- **Rapporto tra caratteri significativi.** Modella il rapporto dei caratteri della stringa p che formano una parola significativa all'interno del dizionario Inglese. Un valore basso indica la presenza di algoritmi automatici. In dettaglio, si divide p in n sotto-parole significative w_i di almeno 3 caratteri: $|w_i| \geq 3$ cercando di

famiglie
mal-
ware

mostrare
ta-
bella
esem-
pio
di-
versi
DGA

descrivere
di-
stri-
bu-
zione
ca-
rat-
teri
Ale-
xa vs
dga

lasciare fuori meno caratteri possibili:

$$R(d) = R(p) = \frac{\max(\sum_{i=1}^n |wi|)}{|p|}$$

Se $p = \text{facebook}$, $R(p) = \frac{(|\text{face}| + |\text{book}|)}{8} = 1$ allora il dominio è composto completamente da parole significative, mentre $p = \text{pub03str}$, $R(p) = \frac{|\text{pub}|}{8} = 0.375$.

- **Punteggio di normalità degli n-grammi:** Questa classe di *features* modella la pronunciabilità di un nome di dominio rispetto la lingua Inglese. Più la combinazione di fonemi del dominio è presente all'interno del Dizionario Inglese più tale dominio è pronunciabile. Domini con un basso numero di tali combinazioni sono probabilmente generati alitmicamente. Il calcolo avviene estraendo lo n-gramma di p di lunghezza $n \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ e contando il numero di occorrenze di tale n-gramma all'interno del Dizionario Inglese. Tali *features* sono quindi parametriche rispetto ad n :

$$S_n(d) = S_n(p) = \frac{\sum_{\text{n-gramma } t \text{ in } p} \text{count}(t)}{|p| - n + 1}$$

dove $\text{count}(t)$ sono le occorrenze dello n-gramma nel dizionario. Ad esempio

$$S_2(\text{facebook}) = fa_{109} + ac_{343} + ce_{438} + eb_{29} + bo_{118} + oo_{114} + ok_{45} = 170.8$$

- **Rapporto tra caratteri numerici** Questa *feature* rappresenta il rapporto tra i caratteri numerici presenti all'interno del nome di dominio rispetto la lunghezza totale della parola. Molte famiglie di *malware* utilizzano *DGA* che generano domini tramite una distribuzione uniforme di caratteri alfabetici minuscoli e numeri, questo porta a domini generati alitmicamente che presentano una maggior presenza di numeri al loro interno rispetto ai domini reali.
- **Rapporto tra vocali e consonanti** Questa *feature* modella il rapporto tra vocali e consonanti all'interno del nome di dominio.
- **Lunghezza del nome di dominio** Questa *feature* calcola la lunghezza del dominio. Molte famiglie di *malware* utilizzano *DGA* che generano domini di lunghezza costante, generalmente molto lunghi rispetto ai domini reali.

L'implementazione di tali *features* ha permesso di ottenere un *dataset* in grado di modellare le caratteristiche linguistiche dei nomi di dominio mostrati al capitolo 3.1.1. Da tale spunto è partita la fase iniziale di *testing*

3.1.3 Output

L'obiettivo di tale classificatore è quello di riuscire a separare in maniera efficace i domini reali da quelli generati alitmicamente. A tale proposito ???

Durante la fase di sperimentazione il classificatore si è rivelato efficace rispetto la maggior parte delle famiglie di *DGA*. Il caso particolare della famiglia *suppobox* [7] ha messo in particolare difficoltà il classificatore in quanto tale algoritmo genera domini in maniera pseudo-casuale, concatenando due parole a partire da un *subset* del dizionario inglese di 384 parole. Tale caratteristica fa sì che le *features* linguistiche estratte da questa famiglia di *malware* siano molto simili a quelle presenti nei domini reali.

A partire da questo risultato si scelto di procedere con la progettazione di un classificatore neurale in grado di superare tale problematica.

3.2 Classificatore Neurale

Questo classificatore neurale nasce con l'intento di superare le difficoltà incontrate dal precedente classificatore basato su *Random Forest*, utilizzando le caratteristiche delle reti neurali, in grado di estrarre *features* a partire dai dati grezzi. Si è scelto di partire dall'architettura di tipo *Multilayer Perceptron* con l'obiettivo di ottenere risultati migliori rispetto al caso mostrato nella sezione precedente.

I passi del progetto sono stati la codificazione dei domini in valori numerici, l'individuazione di una architettura ottimale per classificare i dati in esame ed un'ultima fase di *tuning* degli iperparametri della rete neurale.

3.2.1 Input

A partire dal *dataset* creato per il precedente caso, si è deciso di convertire direttamente i nomi di dominio alfanumerici in vettori numerici, mappati secondo il dizionario di tutti i caratteri ammessi [8] (lettere minuscole a-z, numeri 0-9, tratto d'unione "-").

ampliare

que-
sta
sezio-
ne e
chiede
aMar-
chet-
ti

indicare

il
capi-
tolo
coi
risul-
tati
di
Ran-
dom
Fore-
st

mostrare

esem-
pio
sup-
po-
box

????? ??????

L'obiettivo è quello di fornire al classificatore neurale in questione una rappresentazione il più possibile aderente ai dati reali, senza l'ausilio di *features* ingegnerizzate a priori, lasciando così la libertà alla rete neurale di estrarre le caratteristiche più appropriate per la distinzione dei domini. Come scelta progettuale si è deciso di limitare la dimensione dei domini a 15 caratteri per ognuno, in modo da ottenere un *dataset* di dimensioni fissate e sopperire alle differenti lunghezze di ogni dominio tramite un semplice *padding* di zeri in testa ad ogni stringa codificata.

Assieme ai dati codificati è stato generato un vettore di *target* nel quale viene indicato da 0 o da 1 se il dominio in esame è di tipo reale o generato algoritmicamente. L'obiettivo quindi è di attuare un classificatore binario in grado di prevedere correttamente a quale categoria appartiene un dominio esaminato

3.2.2 Architettura

L'architettura scelta in prima fase è stata quella del *Multilayer Perceptron* (abbr. *MLP*), una tipologia di rete neurale *feedforward* tipicamente formata da almeno tre livelli di nodi. Ad esclusione del livello di *input* i livelli del MLP utilizzano funzioni di attivazione non lineari che permettono di eseguire distinzioni tra dati non linearmente separabili. Considerando una rete formata da m neuroni, se si considera d come numero di input, si avrà il seguente output

$$y_j = y \left(\sum_{i=0}^d w_{ji} x_i \right)$$

nel quale x_i sono gli input e w_{ji} sono i pesi di ogni input combinati con ogni output.

Nel caso in esame è stata utilizzata per i livelli interni la funzione di attivazione *Rectifier Linear Unit* (ReLU) [9] definita dalla funzione

$$f(x) = x^+ = \max(0, x)$$

dove x rappresenta l'*input* del neurone. I vantaggi di tale funzione sono una migliorata *performance* rispetto ad altre funzioni simili come *tanh* e *sigmoid* per quel che riguarda la convergenza della discesa stocastica del gradiente.

aggiungere

ed
esten-
dere
la
teo-
ria
MLP
nel
capi-
tolo

Per quel che riguarda la funzione di attivazione del livello di *output* si è scelta la funzione *sigmoidea*, definita dalla formula

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}$$

La struttura finale del *MLP* in esame è stata raggiunta dopo una serie di test sperimentali in cui si sono messi a confronto tre modelli differenti di per numero di neuroni all'interno degli *hidden layer*:

- un modello ridotto composto da un layer di input con un numero di neuroni pari alla dimensione delle stringhe codificate, un layer intermedio di dimensione dimezzata rispetto al precedente ed il layer finale di uscita di dimensione 1 per attuare la classificazione binaria, oggetto di studio.
- un modello allargato composto da un layer di input con un numero di neuroni pari alla dimensione delle stringhe codificate, due layer intermedi di dimensioni moltiplicate di diversi ordini rispetto al layer iniziale ed un layer finale di dimensione 1.
- un modello intermedio composto da un layer di input con un numero di neuroni pari alla dimensione delle stringhe codificate, un layer intermedio di dimensione 128, un layer di dimensione minore a 64 ed un layer finale di dimensione 1. (Figura 3.1)

I tre modelli messi a confronto hanno mostrato risultati simili, tuttavia il modello intermedio si è dimostrato più performante, con un costo computazionale irrisorio rispetto al modello allargato, pertanto è stato scelto come riferimento per gli studi successivi.

3.2.3 Output

L'intento della rete neurale proposta è quello di classificare autonomamente domini reali da domini generati alitmicamente, con l'obiettivo di superare le fragilità del classificatore precedente (3.1) ed avere una linea di confronto affidabile per lo *step*

inserire
grafo
sig-
moid

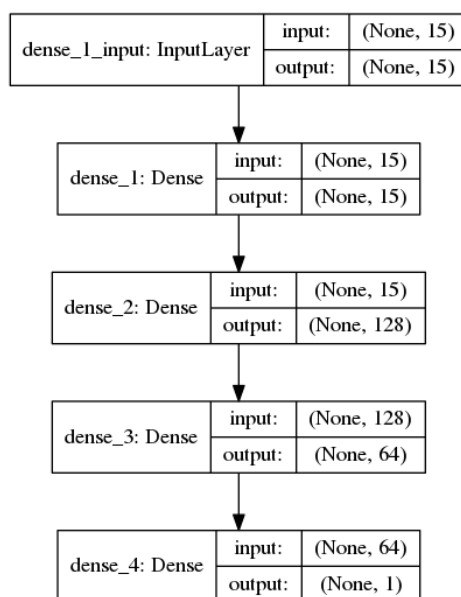


Figura 3.1: Grafico del modello intermedio. Escluso il layer di input iniziale, si notino gli *hidden layer* dense2 e dense3 di dimensioni rispettivamente 128 e 64

di lavoro successivo: l'introduzione di un sistema di *adversarial learning* che possa rafforzare tale classificatore.

come
am-
plia-
re????????

3.2.4 Realizzazione Adversarial Learning

Ricerche precedenti hanno dimostrato che molti modelli di machine learning, incluse le reti neurali, sono vulnerabili agli *adversarial examples* [10], [11]. In particolare la ricerca proposta in [11] introduce il metodo del *fast gradient sign* per scoprire *adversarial examples* perturbando un campione noto x con una piccola quantità $\Delta x \in \text{sign}(\nabla_x J(\theta, x, y))$ dove θ rappresenta i parametri del modello e J il costo necessario a classificare x come y . Separatamente [12] propone l'uso di *Generative Adversarial Network* (abbr. *GAN*) come *framework* in grado di generare campioni artificiali provenienti dalla stessa distribuzione del training set. Le GAN incorporano due modelli: un generatore ed un discriminatore i quali competono in una serie di turni antagonisti. All'interno del contesto del lavoro presentato in questo elaborato, il generatore impara a creare nuovi domini artificiali mentre il discriminatore impara a distinguere tali domini artificiali da quelli reali. L'intento di tale lavoro è usare la GAN

per produrre domini artificiali realistici e di conseguenza incrementare la precisione del classificatore presentato nella sezione precedente attraverso l'*adversarial training*.

3.3 Autoencoder

Il punto di partenza per il lavoro di progettazione di una *GAN* è stato l'implementazione di un *Autoencoder* funzionante. Un *Autoencoder* è un modello di rete neurale non supervisionata con lo scopo di riprodurre il proprio input passando attraverso una rappresentazione codificata, generalmente a dimensione inferiore [13] [14]. Si supponga di avere un set di training $\{x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}, \dots\}$ dove $x^{(i)} \in \mathbb{R}^n$. L'obiettivo di un autoencoder generico è $y^{(i)} = x^{(i)}$ cercando di imparare una funzione che approssima x $h_{W,b}(x) \approx x$. Un *autoencoder* tipicamente consiste in due macro-componenti:

- funzione **Encoder** $h = f(x)$ la quale trasforma l'input in una rappresentazione codificata (generalmente a dimensione minore)
- funzione **Decoder** $r = g(h)$ in grado di ricostruire l'input a partire dalla rappresentazione codificata.

Tuttavia il reale obiettivo di un *autoencoder* non è quello di imparare perfettamente a riprodurre l'input fornito (in quanto sarebbe un'operazione priva di utilità), bensì vengono introdotti vincoli che ne limitano la capacità di riproduzione ad una sola approssimazione dei dati di ingresso. Grazie a tali vincoli il modello è obbligato a dare priorità agli aspetti fondamentali dell'input, imparandone le proprietà principali. L'obiettivo di tale implementazione nel contesto di questo elaborato è poter cogliere le caratteristiche fondamentali che compongono i domini reali, per poterli riprodurre al meglio all'interno della *GAN* e generare domini simili a quelli reali a partire da rumore casuale.

3.3.1 Dataset Autoencoder

Il *dataset* utilizzato per il training di tale *autoencoder* è lo stesso mostrato nella sezione 3.2.1, in cui i domini sono mappati in vettori numerici, secondo il dizionario di caratteri

ammissibili per i domini. Durante la fase di implementazione si è reso necessario un ulteriore *step* di *preprocessing*: i domini codificati in sequenze di valori interi sono stati ulteriormente codificati tramite il *one hot encoding* [15] in modo da formare un tensore 2D per ogni dominio, in cui ogni riga è formata da sequenze di bit a 0 tranne il carattere nella posizione indicata dal dizionario, il quale è indicato ad 1.

Questo ulteriore passaggio è diventato necessario durante l'implementazione della GAN, in modo da poter utilizzare il tensore di output del *decoder* come ingresso per l'*encoder*.

3.3.2 Architettura Autoencoder

L'architettura dell'*encoder* in esame è lascamente ispirata al lavoro mostrato in [16] mentre il *decoder* è approssimativamente una immagine speculare dell'*encoder*.

Si indichi \mathbb{V} come il set di caratteri validi per i domini di rete; l'*encoder* contiene un primo livello di Embedding nel quale viene imparata una mappatura lineare da $\mathbb{V} \mapsto \mathbb{R}^d$, risultando in un vettore d-dimensionale per ogni carattere del dominio. Successivamente vengono applicati dei filtri convoluzionali alle mappature precedenti con l'obiettivo di catturare n-grammi significativi all'interno dei domini reali. All'interno del filtro convoluzionale vengono selezionate le caratteristiche più importanti attraverso *average pooling*. Il layer successivo di concatenazione assembla l'output dei diversi filtri in un tensore di dimensione ridotta rispetto all'input iniziale e lo passa ad una LSTM la quale accumula stato lungo la sequenza di caratteri e ritorna in uscita il dominio codificato in forma di vettore mono-dimensionale.

Il *decoder* è lascamente l'inverso del processo di codifica: il dominio codificato dato in input viene ripetuto un numero di volte equivalente alla lunghezza massima di nome di dominio decisa a priori e passato ad una LSTM. La sequenza di emissioni da parte del layer LSTM viene fornita agli stessi filtri convoluzionali presenti all'interno dell'*encoder*. Questo risulta in un vettore \mathbb{V} -dimensionale per ogni elemento della sequenza che compone il dominio. Lo step finale consiste di un dense layer con distribuzione temporale che agisce come regressore multinomiale. A causa dell'attivazione

inserire
ta-
bella
di
esem-
pio.

softmax attuata sul *dense layer*, l'output del decoder rappresenta una distribuzione multinomiale dei caratteri di \mathbb{V} per ogni step temporale, la quale può essere campionata per produrre un nuovo nome di dominio contenente le caratteristiche principali dei nomi di dominio usati in input.

In figura 3.2 è mostrata la struttura di massima dell'autoencoder. Di seguito vengono illustrati in dettaglio le principali componenti che compongono l'*autoencoder*.

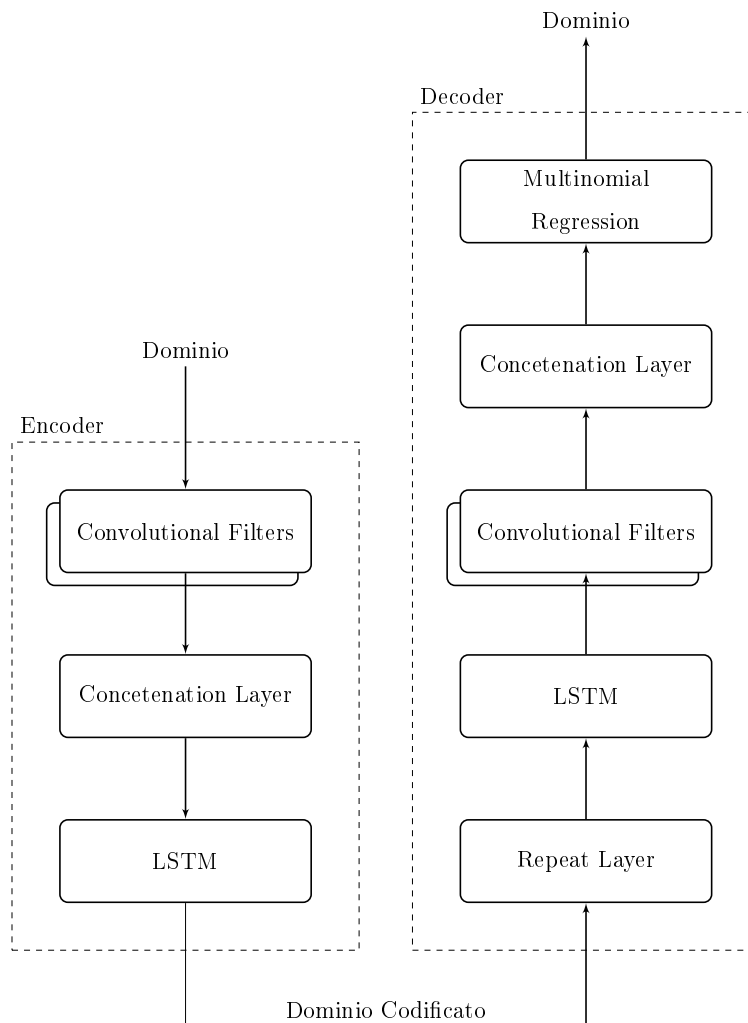


Figura 3.2: Struttura generica di un autoencoder, il quale mappa l'input x in un output r attraverso una rappresentazione codificata h

3.3.2.1 Encoder

3.3.2.2 Decoder

3.4 Generative Adversarial Network

3.4.1 Output

Capitolo 4

Implementazione

4.1 Classificatore Random Forest

ottenere
i
para-
metri
di
ran-
dom-
forest
del
mi-
glior
risul-
tato

differenze
pra-
tiche
tra
RF,
SVM,
GNB

4.1.1 Input

4.1.2 Composizione Interna

4.1.3 Output

4.2 Classificatore Neurale

4.2.1 Input

4.2.2 Composizione Interna

4.2.3 Output

4.3 Realizzazione Adversarial Learning

4.3.1 Input

4.3.2 Composizione Interna

4.3.3 Output

Capitolo 5

Risultati

In questo capitolo si propongono degli esempi per gli oggetti utilizzati più di frequente in latex: la Sezione 1.1 descrive come scrivere citazioni, la Sezione 1.2 propone degli esempi di oggetti float, la Sezione 1.3 descrive come compilare questo documento.

Capitolo 6

Conclusioni

In questo capitolo si propongono degli esempi per gli oggetti utilizzati più di frequente in latex: la Sezione 1.1 descrive come scrivere citazioni, la Sezione 1.2 propone degli esempi di oggetti float, la Sezione 1.3 descrive come compilare questo documento.

Bibliografia

- [1] Amazon, “Alexa.” <https://www.alexa.com/>, visited in Sep. 2017.
- [2] A. Abakumov, “Dga.” <https://github.com/andrewaeva/DGA>, visited in Sep. 2017.
- [3] M. Antonakakis, R. Perdisci, Y. Nadji, N. Vasiloglou, S. Abu-Nimeh, W. Lee, and D. Dagon, “From throw-away traffic to bots: Detecting the rise of dga-based malware,” in *Presented as part of the 21st USENIX Security Symposium (USENIX Security 12)*, (Bellevue, WA), pp. 491–506, USENIX, 2012.
- [4] S. Yadav, A. K. K. Reddy, A. N. Reddy, and S. Ranjan, “Detecting algorithmically generated malicious domain names,” in *Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, IMC ’10*, (New York, NY, USA), pp. 48–61, ACM, 2010.
- [5] S. Yadav, A. K. K. Reddy, A. L. N. Reddy, and S. Ranjan, “Detecting algorithmically generated domain-flux attacks with dns traffic analysis,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 20, pp. 1663–1677, Oct. 2012.
- [6] S. Schiavoni, F. Maggi, L. Cavallaro, and S. Zanero, *Phoenix: DGA-Based Botnet Tracking and Intelligence*, pp. 192–211. Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [7] J. Geffner, “End-to-end analysis of a domain generating algorithm malware family,” *Black Hat USA*, vol. 2013, 2013.
- [8] ICANN. <https://www.icann.org/>.

-
- [9] X. Glorot, A. Bordes, and Y. Bengio, “Deep sparse rectifier neural networks,” in *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics* (G. Gordon, D. Dunson, and M. Dudík, eds.), vol. 15 of *Proceedings of Machine Learning Research*, (Fort Lauderdale, FL, USA), pp. 315–323, PMLR, 11–13 Apr 2011.
- [10] C. Szegedy, W. Zaremba, I. Sutskever, J. Bruna, D. Erhan, I. Goodfellow, and R. Fergus, “Intriguing properties of neural networks,” 2013.
- [11] I. J. Goodfellow, J. Shlens, and C. Szegedy, “Explaining and harnessing adversarial examples,” 2014.
- [12] I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, “Generative adversarial networks,” 2014.
- [13] Y. Bengio, “Learning deep architectures for ai,” *Foundations and Trends® in Machine Learning*, vol. 2, no. 1, pp. 1–127, 2009.
- [14] C.-Y. Liou, J.-C. Huang, and W.-C. Yang, “Modeling word perception using the elman network,” *Neurocomput.*, vol. 71, pp. 3150–3157, Oct. 2008.
- [15] D. Harris and S. Harris, *Digital Design and Computer Architecture, Second Edition*, p. 129. Morgan Kaufmann, 2012.
- [16] Y. Kim, Y. Jernite, D. Sontag, and A. M. Rush, “Character-aware neural language models,” 2015.