Автоматическое распознавание речи. Языковые модели

П. А. Холявин

p.kholyavin@spbu.ru

06.03.2024

Задача распознавания речи

Если $O = o_1, o_2, \ldots, o_n$ – звуковая последовательность,
$W = w_1, w_2, \ldots, w_n$ – последовательность слов, то

$$\hat{W} = \underset{W \in L}{argmax}\, P(W|O)$$

$$\hat{W} = \underset{W \in L}{argmax}\, \frac{P(O|W)P(W)}{P(O)} = \underset{W \in L}{argmax}\, P(O|W)P(W)$$

Языковые модели

Отвечают за P(W)

1. Статистические
2. Формальные

Статистические ЯМ

$$P(W) = P(w_1, w_2, \dots, w_n) =$$

$$= P(w_1)P(w_2|w_1)P(w_3|w_1, w_2) \dots P(w_n|w_1, w_2, \dots, w_{n-1}) =$$

$$= \prod_{i=1}^{n} P(w_i|w_1, w_2, \dots, w_{i-1})$$

$P(w_i)$ – униграммы
$P(w_i|w_{i-1})$ – биграммы
три-, тетра-, …

Вычисление N-грамм

$$P(w_n|w_{n-1}) = \frac{C(w_{n-1}w_n)}{\sum_w C(w_{n-1}w_n)} = \frac{C(w_{n-1}w_n)}{C(w_{n-1})}$$

<s> John read a book </s>
<s> I read a different book </s>
<s> John read a book by Mulan </s>

P(John read a book) = P(John|<s>) * P(read|John)
* P(a|read) * P(book|a) * P(</s>|book)

P(Mulan read a book) = P(Mulan|<s>) * ... = 0

Перплексия модели

(коэффициент неопределённости)
Вычисляется на тестовой последовательности длиной N. Чем ниже перплексия, тем лучше модель.

$$\text{perplexity}(W) = P(w_1 w_2 \ldots w_N)^{-\frac{1}{N}} = \sqrt[N]{\frac{1}{P(w_1 w_2 \ldots w_N)}}$$

$$\text{perplexity}(W) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^{N} \frac{1}{P(w_i | w_1 \ldots w_{i-1})}}$$

Перплексия связана с кросс-энтропией:

$$H(\mathbf{W}) = -\frac{1}{N_{\mathbf{W}}} \log_2 P(\mathbf{W}) \qquad PP(\mathbf{W}) = 2^{H(\mathbf{W})}$$

Сглаживание N-грамм

1. Сглаживание Лапласа (Laplace smoothing, add-1 smoothing)

$$P_{\text{Laplace}}(w_i) = \frac{c_i + 1}{N + V}$$

$$c_i^* = (c_i + 1)\frac{N}{N + V}$$

$$d_c = \frac{c^*}{c}$$

Сглаживание N-грамм

$$P_{\text{Laplace}}(w_n|w_{n-1}) = \frac{C(w_{n-1}w_n)+1}{\sum_w (C(w_{n-1}w)+1)} = \frac{C(w_{n-1}w_n)+1}{C(w_{n-1})+V}$$

```
<s> John read a book </s>
<s> I read a different book </s>
<s> John read a book by Mulan </s>
```

Сглаживание N-грамм

2. Плюс-k сглаживание

$$P^*_{\text{Add-k}}(w_n|w_{n-1}) = \frac{C(w_{n-1}w_n)+k}{C(w_{n-1})+kV}$$

Сглаживание N-грамм

3. Откат и интерполяция

$$P_{smooth}(w_i \mid w_{i-n+1}...w_{i-1})$$
$$= \begin{cases} \alpha(w_i \mid w_{i-n+1}...w_{i-1}) & \text{if } C(w_{i-n+1}...w_i)>0 \\ \gamma(w_{i-n+1}...w_{i-1})P_{smooth}(w_i \mid w_{i-n+2}...w_{i-1}) & \text{if } C(w_{i-n+1}...w_i)=0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}(w_n|w_{n-2}w_{n-1}) &= \lambda_1 P(w_n) \\ &+\lambda_2 P(w_n|w_{n-1}) \\ &+\lambda_3 P(w_n|w_{n-2}w_{n-1}) \end{aligned}$$

Сглаживание N-грамм

а) Откат Катца

$$P_{\mathrm{BO}}(w_n|w_{n-N+1:n-1}) = \begin{cases} P^*(w_n|w_{n-N+1:n-1}), & \text{if } C(w_{n-N+1:n}) > 0 \\ \alpha(w_{n-N+1:n-1})P_{\mathrm{BO}}(w_n|w_{n-N+2:n-1}), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Сглаживание N-грамм

б) Сглаживание Гуда-Тьюринга

$$r^* = (r+1)\frac{n_{r+1}}{n_r}$$

где n_r – количество n-грамм, встретившихся ровно r раз

Сглаживание N-грамм

в) Сглаживание Кнезера-Нея

ALGORITHM 11.3 KNESER-NEY BIGRAM SMOOTHING

$$P_{KN}(w_i \mid w_{i-1}) = \begin{cases} \dfrac{\max\{C(w_{i-1}w_i) - D, 0\}}{C(w_{i-1})} & \text{if } C(w_{i-1}w_i) > 0 \\ \alpha(w_{i-1}) P_{KN}(w_i) & \text{otherwise} \end{cases}$$

where $P_{KN}(w_i) = \mathbb{C}(\bullet w_i) / \sum_{w_i} \mathbb{C}(\bullet w_i)$, $\mathbb{C}(\bullet w_i)$ is the number of unique words preceding w_i.

$\alpha(w_{i-1})$ is chosen to make the distribution sum to 1 so that we have:

$$\alpha(w_{i-1}) = \frac{1 - \sum_{w_i : C(w_{i-1}w_i) > 0} \dfrac{\max\{C(w_{i-1}w_i) - D, 0\}}{C(w_{i-1})}}{1 - \sum_{w_i : C(w_{i-1}w_i) > 0} P_{KN}(w_i)}$$

Сглаживание N-грамм

г) “Глупый” откат (stupid backoff)

$$S(w_i|w_{i-N+1:i-1}) = \begin{cases} \dfrac{\text{count}(w_{i-N+1:i})}{\text{count}(w_{i-N+1:i-1})} & \text{if count}(w_{i-N+1:i}) > 0 \\ \lambda S(w_i|w_{i-N+2:i-1}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Классовые модели

$$P(w_i|c_{i-n+1}\dots c_{i-1}) = P(w_i \mid c_i)P(c_i|c_{i-n+1}\dots c_{i-1})$$

Членами этих моделей являются не конкретные слова, а классы слов.

Классы могут быть:

1. Построены вручную
2. Частями речи
3. Результатом автоматической кластеризации

Морфемные модели

Модель основа (s)/флексия (e):

$$P(s_i|\ldots w_i) = P(s_i|\ldots s_{i-1})$$

$$P(e_i|\ldots w_i) = P(e_i|s_i e_{i-1})$$

Адаптивные модели

Интерполяция статической и локальной динамической (кэш) моделей

$$P_{cache}(w_i \mid w_{i-n+1}...w_{i-1})$$
$$= \lambda_c P_s(w_i \mid w_{i-n+1}...w_{i-1}) + (1-\lambda_c) P_{cache}(w_i \mid w_{i-2}w_{i-1})$$

Адаптивные модели

TF-IDF модель

$$TF(t,d) = \frac{number\ of\ times\ t\ appears\ in\ d}{total\ number\ of\ terms\ in\ d}$$

$$IDF(t) = log\frac{N}{1+df}$$

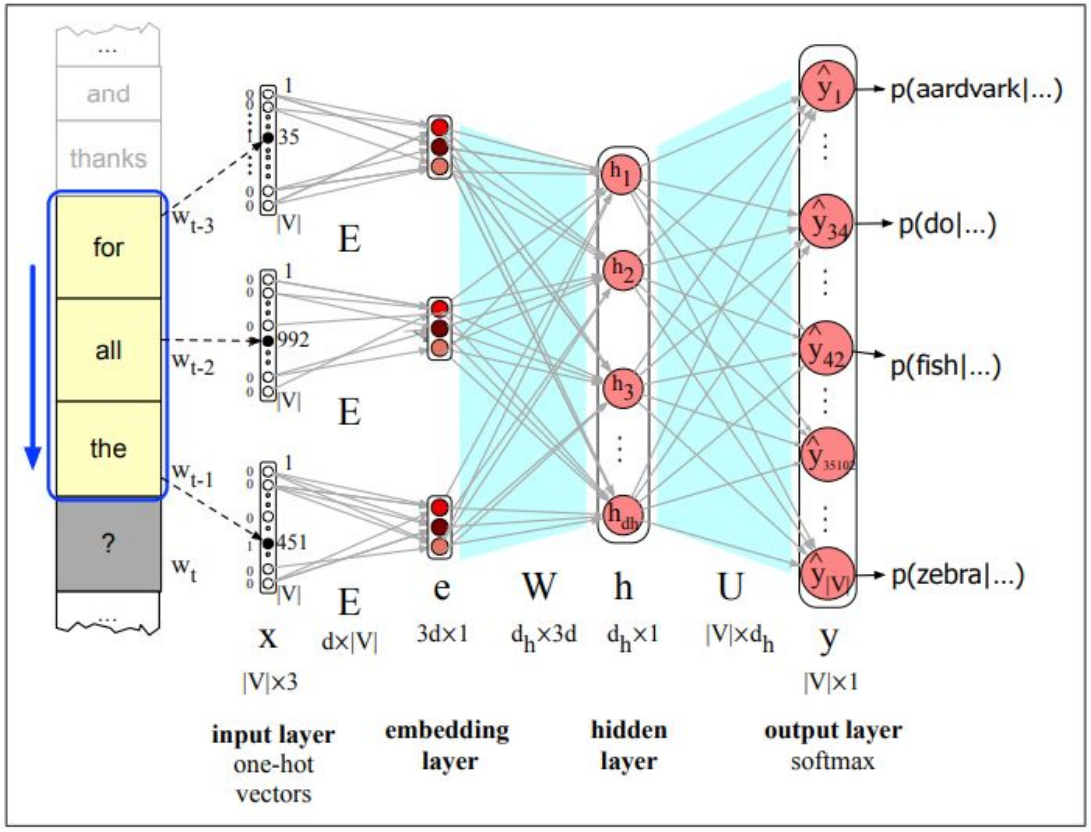
$$TF-IDF(t,d) = TF(t,d) * IDF(t)$$

$$Similarity(D_i, D_j) = \frac{\sum_k tfidf_{ik} * tfidf_{jk}}{\sqrt{\sum_k (tfidf_{ik})^2 * \sum_k (tfidf_{jk})^2}}$$

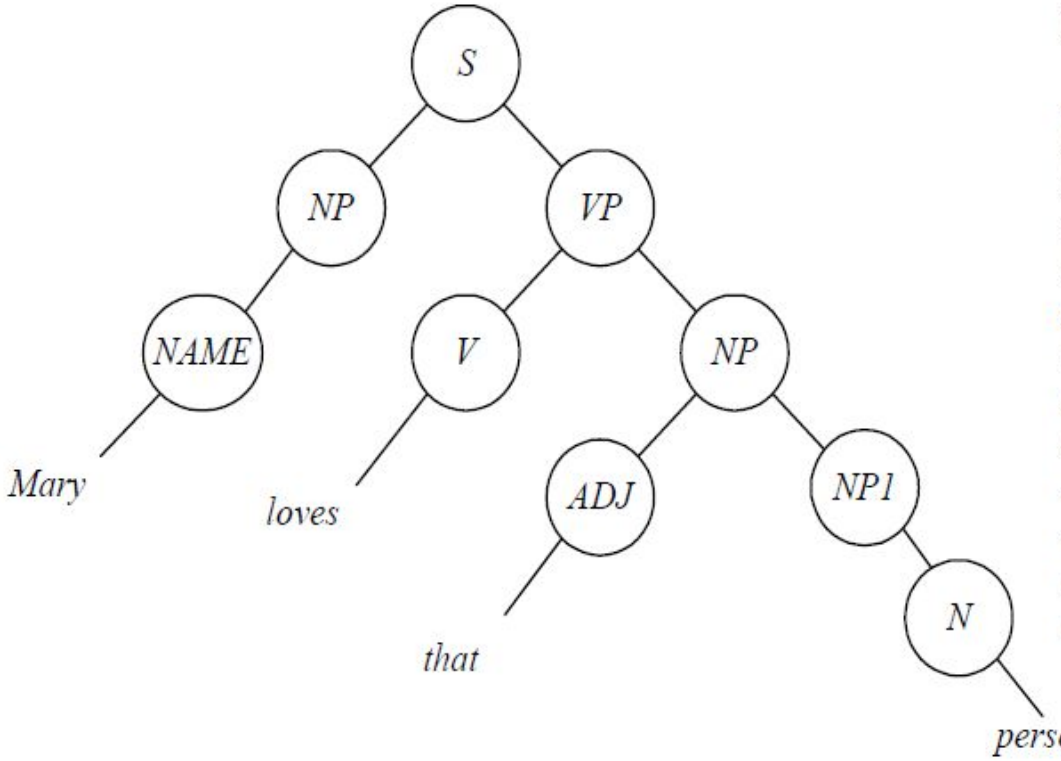
Сравнение моделей

Models	Perplexity	Word Error Rate
Unigram Katz	1196.45	14.85%
Unigram Kneser-Ney	1199.59	14.86%
Bigram Katz	176.31	11.38%
Bigram Kneser-Ney	176.11	11.34%
Trigram Katz	95.19	9.69%
Trigram Kneser-Ney	91.47	9.60%

Нейронные модели



Формальные модели



Rewrite Rules:

1. $S \rightarrow NP\ VP$
2. $VP \rightarrow V\ NP$
3. $VP \rightarrow AUX\ VP$
4. $NP \rightarrow ART\ NP1$
5. $NP \rightarrow ADJ\ NP1$
6. $NP1 \rightarrow ADJ\ NP1$
7. $NP1 \rightarrow N$
8. $NP \rightarrow NAME$
9. $NP \rightarrow PRON$
10. $NAME \rightarrow Mary$
11. $V \rightarrow loves$
12. $ADJ \rightarrow that$
13. $N \rightarrow person$

Спасибо за внимание!