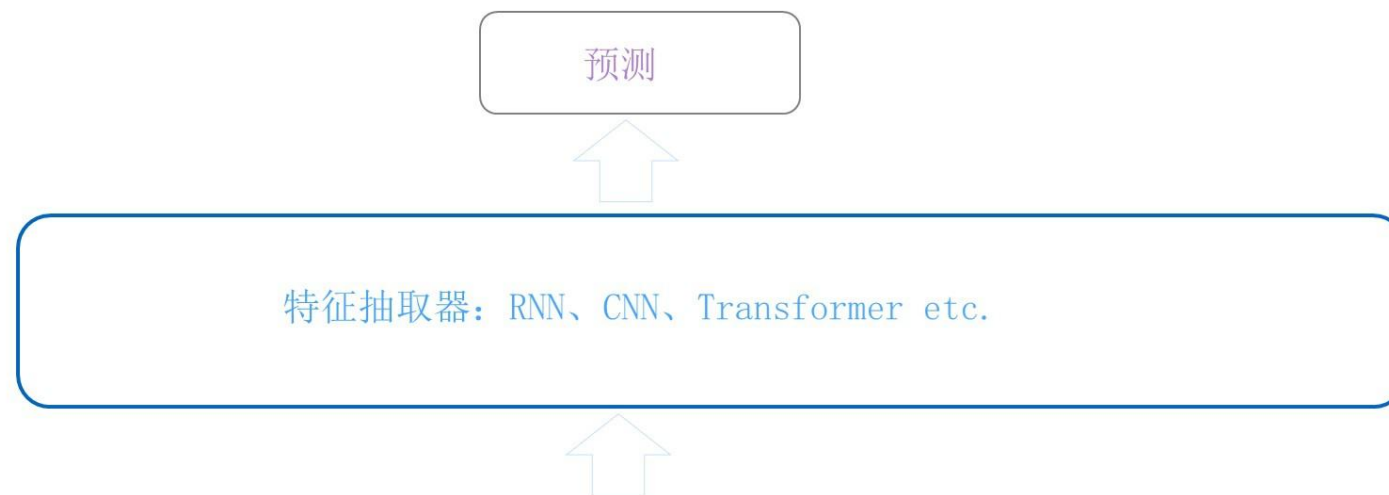


Attention模型中序列的方向信息和位置信息编码

汇报人：吴林志

NLP任务的特点



如果你愿意一层一层的剥开我的心.....那么你会坐牢的我跟你说。

NLP任务的特点和图像有极大的不同

NLP的输入往往是一句话或者一篇文章，所以它有几个特点：

- 输入是个一维线性序列
- 输入是不定长的，有的长有的短
- 序列的**方向信息**很重要： 例：这件衣服贵的很啊！（“很”是修饰“贵”的）
- 单词或者子句的**相对位置关系**很重要，两个单词位置互换可能导致完全不同的意思
 - 例：“你欠我那一千万不用还了”和“我欠你那一千万不用还了”
- 句子中的**长距离特征**对于理解语义也非常关键
 - 例：“如果……，那么……”。预测“那么”时依赖于“如果”。

Self-Attention

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V$$

subspace representation

$$\text{MultiHead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_h)W^O$$

$$\text{where head}_i = \text{Attention}(QW_i^Q, KW_i^K, VW_i^V)$$

$$att_{additive}(h_j, h_i) = V_a \tanh(U_a h_j + W_a h_i + b_a)$$

$$att_{bilinear}(h_j, h_i) = h_j^T W_{bil} h_i$$

$$att_{multiplicative}(h_j, h_i) = h_j^T h_i$$



$$a(h_j, h_i) = \frac{\exp(att(h_j, h_i))}{\sum_{\tilde{i}=0}^N \exp(att(h_j, h_{\tilde{i}}))}$$



$$h_j^* = \sum_{i=0}^N a(h_j, h_i) h_i$$

如何编码Self-Attention中的方向信息？

Directional Self-Attention Network (DiSAN)

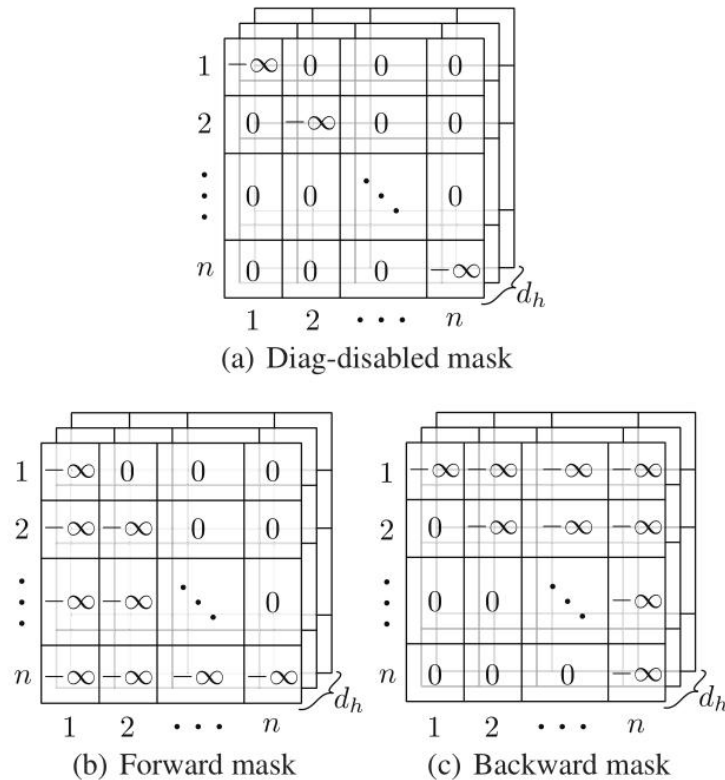


Figure 3: Three positional masks: (a) is the diag-disabled mask M^{diag} ; (b) and (c) are forward mask M^{fw} and backward mask M^{bw} , respectively.

$$M_{ij}^{diag} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ -\infty, & i = j \end{cases} \quad \text{disable the attention of each token to itself}$$

$$M_{ij}^{fw} = \begin{cases} 0, & i < j \\ -\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{the only attention of later token } j \text{ to early token } i$$

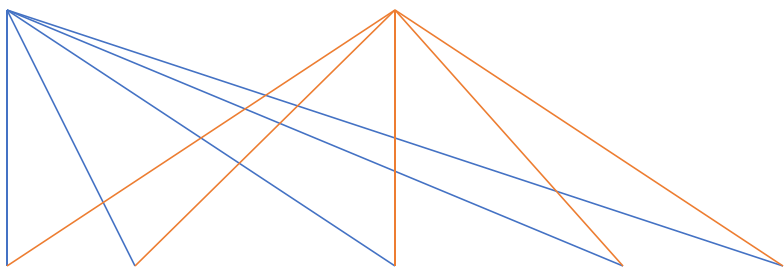
$$M_{ij}^{bw} = \begin{cases} 0, & i > j \\ -\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{the only attention of later token } i \text{ to early token } j$$

$$M_{ij} = -\infty \quad \longleftrightarrow \quad \text{there is no attention of } x_j \text{ to } x_i$$

$$M_{ji} = 0 \quad \longleftrightarrow \quad \text{attention of } x_i \text{ to } x_j \text{ exists}$$

举个栗子：

I come from China !

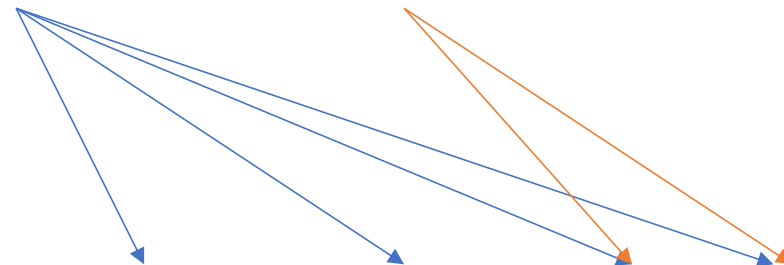


I come from China !

undirectional

forward

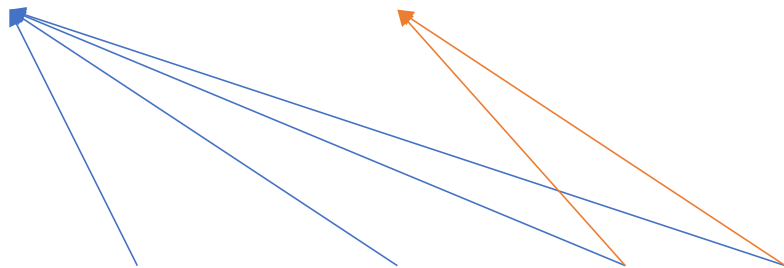
I come from China !



I come from China !

backward

I come from China !



I come from China !

如何编码Self-Attention中的位置信息？

RNN和Attention位置编码的差异

- RNN 通常依靠其循环机制，结合 t 时刻的输入和前一时刻的隐层状态 h_{t-1} 计算出 h_t ，直接通过其顺序结构沿时间维度捕获相对和绝对位置。而非 RNN 模型不需要顺序处理输入，则需要显式编码才能引入位置信息。
- 在同一个输入序列中，不同位置的相同单词的representation完全相同，这样并不能体现单词之间的时序关系，所以要对单词的时序位置进行编码表征。

Transformer的位置编码

- 采用绝对位置编码:

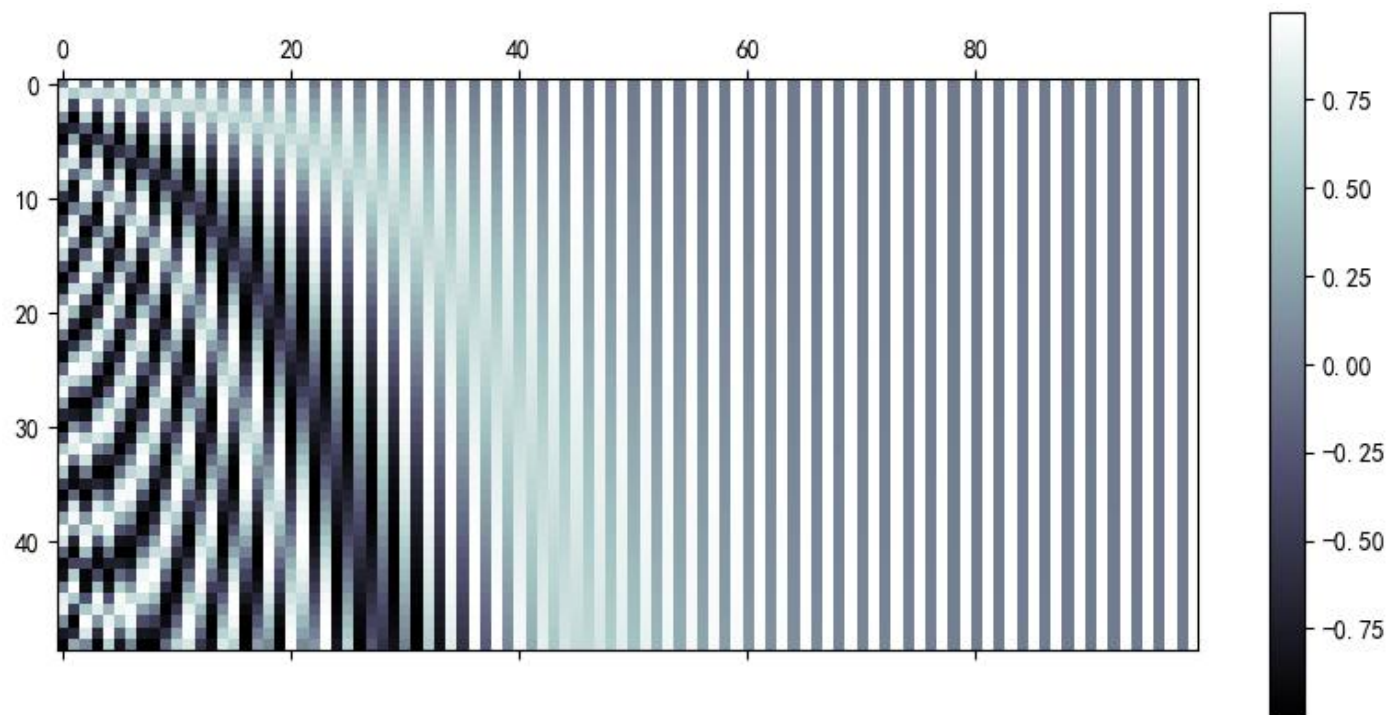
$$PE(i, 2k) = \sin\left(\frac{i}{10000^{2k/d_{\text{model}}}}\right)$$

$$PE(i, 2k + 1) = \cos\left(\frac{i}{10000^{2k/d_{\text{model}}}}\right)$$

序列: I come from China !

位置: 0 1 2 3 4

绝对位置可视化



序列长度为50的100维位置向量可视化的结果

如何变成相对位置编码?

$$PE_{ij}(2k) = \sin\left(\frac{j-i}{10000^{2k/d_{\text{model}}}}\right)$$

$$PE_{ij}(2k+1) = \cos\left(\frac{j-i}{10000^{2k/d_{\text{model}}}}\right)$$

序列: I come from China !

位置: -2 -1 0 1 2

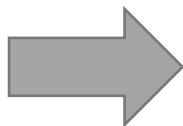
如何变成相对位置编码?

输入: $x = (x_1, \dots, x_n)$ 输出: $z = (z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{R}^{n \times d}$:

$$e_{ij} = \frac{x_i W^Q (x_j W^K)^T}{\sqrt{d_z}}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(e_{ij})}{\sum_{k=1}^n \exp(e_{ik})}$$

$$z_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (x_j W^V)$$



$$e_{ij} = \frac{x_i W^Q (x_j W^K + a_{ij}^K)^T}{\sqrt{d_z}}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(e_{ij})}{\sum_{k=1}^n \exp(e_{ik})}$$

$$z_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} (x_j W^V + a_{ij}^V)$$

$$a_{ij}^K = w_{\text{clip}(j-i, k)}^K$$

$$a_{ij}^V = w_{\text{clip}(j-i, k)}^V$$

$$\text{clip}(x, k) = \max(-k, \min(k, x))$$

RPR 的不在输入时将位置表示与 token 表示相加, 而是选择对 self-attention 进行改动!

useless

模型学习相对位置表示 $w^K = (w_{-k}^K, \dots, w_k^K) \in \mathbb{R}^{(2k+1) \times d}$ (w^V 同理), 同一层的attention heads之间共享, 但是在不同层之间是不同的!

Transformer-XL

非常长距离的Transformer

- ✓ Segment-level recurrence
- ✓ Relative Positional Encoding

片段水平的复现和状态重用

Segment-level recurrence with state reuse

- 为了解决只能利用一个固定长度的context的限制，文中提出了一个recurrence机制。**在训练的时候，先前的segment计算出的隐状态序列，被固定和储存下来，在下一个segment中被当做延长了的context（扩展上下文）再使用。**尽管梯度只留在一个segment里，这个额外的输入使得网络可以利用历史上的信息，使网络向着记住长距离依赖和解决上下文碎裂问题的方向前进。

片段水平的复现和状态重用

Segment-level recurrence with state reuse

- 令两个长度为 L 的片段分别是 $s_\tau = [x_{\tau,1}, \dots, x_{\tau,L}]$ 和 $s_{\tau+1} = [x_{\tau+1,1}, \dots, x_{\tau+1,L}]$ 。表示第 τ 个片段 s_τ 的第 n 个隐状态序列为 $h_\tau^n \in R^{L \times d}$, d 是隐层的维度. 那么片段 $s_{\tau+1}$ 的第 n 个隐状态序列依如下产生

$$\begin{aligned}
 q, k, v: L \times d, (M+L) \times d, * \quad \tilde{\mathbf{h}}_{\tau+1}^{n-1} &= [\text{SG}(\mathbf{h}_\tau^{n-1}) \circ \mathbf{h}_{\tau+1}^{n-1}], & (\text{extended context}) \\
 \mathbf{q}_{\tau+1}^n, \mathbf{k}_{\tau+1}^n, \mathbf{v}_{\tau+1}^n &= \mathbf{h}_{\tau+1}^{n-1} \mathbf{W}_q^\top, \tilde{\mathbf{h}}_{\tau+1}^{n-1} \mathbf{W}_k^\top, \tilde{\mathbf{h}}_{\tau+1}^{n-1} \mathbf{W}_v^\top, & (\text{query, key, value vectors}) \\
 \mathbf{h}_{\tau+1}^n &= \text{Transformer-Layer}(\mathbf{q}_{\tau+1}^n, \mathbf{k}_{\tau+1}^n, \mathbf{v}_{\tau+1}^n). & (\text{self-attention + feed-forward})
 \end{aligned}$$

the function $SG(\cdot)$ stands for stop-gradient, the notion $[h_u \circ h_v]$ indicates the concatenation of two hidden sequences along the length dimension, W denotes model parameters.

片段长度为4时Transformer-XL的训练和评估过程

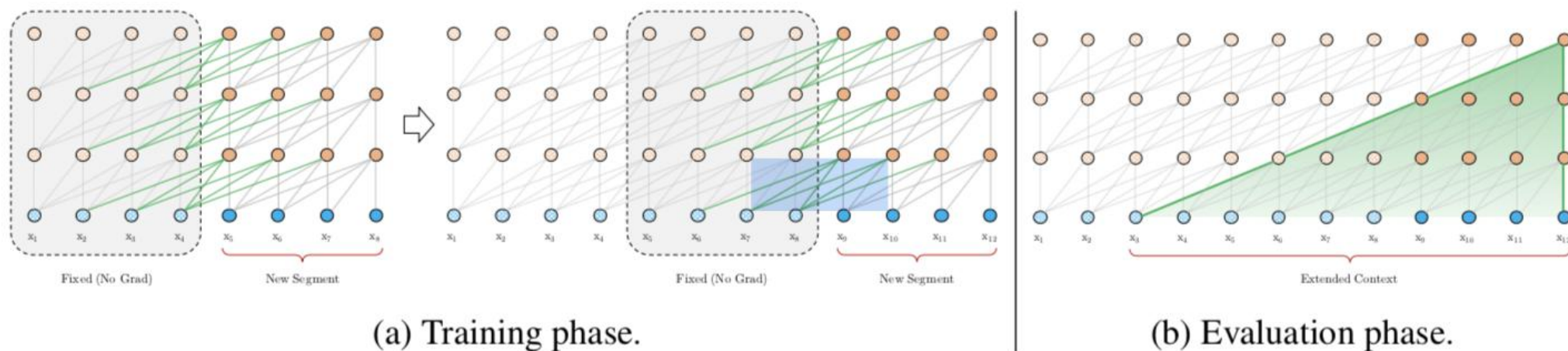


Figure 2: Illustration of the Transformer-XL model with a segment length 4.

相对位置编码 relative positional encodings

- 在标准的Transformer中，序列顺序的信息由位置编码提供，可以用 $U \in \mathbb{R}^{L_{max} \times d}$ 表示，第 i 行对应片段中第 i 个绝对位置， L_{max} 是模型输入的最大长度。Transformer的真实输入是element-wise的word embedding和位置编码的加和（和segment embeddings）。
- 采用这样的位置编码在文中的复现机制中，模型没有信息来区分先前和当下的片段 $(x_{\tau,j}, x_{\tau+1,j})$ 在位置上的不同。
- 为避免这种失败的模式，基本的想法是在隐状态中编码相对位置信息。概念上讲，位置编码给了模型在如何收集信息上一个时间的提示或者“倾向”，也就是，哪里需要注意。
- 基于同样的目的，除了将这样的倾向静态的合并到开始的嵌入层，也可以将同样的信息引入到每一层的注意力得分上。更重要的是，将时间的倾向定义为一种相对的方式更符合直觉和更泛化。

相对位置编码 relative positional encodings

- 可以定义一组相对位置编码 $R \in \mathbb{R}^{(M+L) \times d}$ ，第 i 行 R_i 表示两个位置的相对距离为 i 时的编码。这样模型就能区分出 $(x_{\tau,j}, x_{\tau+1,j})$ 。
- 在标准Transformer中，在同一个片段中query q_i 和 key 向量 k_j 之间的注意力得分可以分解为：

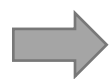
$$\mathbf{A}_{i,j}^{\text{abs}} = q_i^\top k_j = \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_k \mathbf{E}_{x_j}}_{(a)} + \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_k \mathbf{U}_j}_{(b)} + \underbrace{\mathbf{U}_i^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_k \mathbf{E}_{x_j}}_{(c)} + \underbrace{\mathbf{U}_i^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_k \mathbf{U}_j}_{(d)}.$$

$$(W_q(E_{x_i} + U_i))^\top \cdot (W_k(E_{x_j} + U_j))$$

- 根据只依靠相对位置信息的想法，可以重新用参数表示这四项：

$$\mathbf{A}_{i,j}^{\text{rel}} = \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(a)} + \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(b)} + \underbrace{\mathbf{u}^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(c)} + \underbrace{\mathbf{v}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(d)}.$$

$$(W_q(E_{x_i} + U_i))^\top (W_k E_{x_j}) + (W_q(E_{x_i} + U_i))^\top (W_k U_j)$$



$$(W_q E_{x_i} + u)^\top (W_{k,E} E_{x_j}) + (W_q E_{x_i} + v)^\top (W_{k,R} R_{i-j})$$

相对位置编码 relative positional encodings

1. 将所有的key vector中的绝对位置编码 U_j 替换为相对位置编码 R_{i-j} 。 R 是一个正弦编码矩阵 (attention is all you need), 没有可学习的参数。
2. 引入可训练的参数 $u \in \mathbb{R}^d$ 代替term(c)中的query $U_i^\top W_q^\top$ 。也就是, 对于任何的query位置, query向量都一样, 表明不管query中位置如何, 对不同单词的注意力倾向是相同的。同样的原因, 加入一个可训练的参数 $v \in \mathbb{R}^d$ 来代替term(d)中的 $U_i^\top W_q^\top$ 。
3. 分离两个权重矩阵 $W_{k,E}$ 和 $W_{k,R}$, 分别产生基于内容的key向量和基于位置的key向量。

相对位置编码 relative positional encodings

- 在新的参数下， 每一个term都有一个直觉上的意义:
- term(a) 代表**基于内容的寻址**;
- term(b) 捕获**基于内容的位置偏差**;
- term(c) 管理一个**全局的内容偏差**;
- term(d) 编码了**全局的位置偏差**。

$$\mathbf{A}_{i,j}^{\text{rel}} = \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(a)} + \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(b)} + \underbrace{\mathbf{u}^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(c)} + \underbrace{\mathbf{v}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(d)}.$$

Transformer-xl模型计算过程总结

- 一个N层Transformer-XL，有1个attention head的计算过程可以总结如下：

$$\begin{aligned}
 \text{For } n = 1, \dots, N : \quad & \tilde{\mathbf{h}}_{\tau}^{n-1} = [\text{SG}(\mathbf{m}_{\tau}^{n-1}) \circ \mathbf{h}_{\tau}^{n-1}] \quad \tilde{\mathbf{h}}_{\tau+1}^{n-1} \in \mathbb{R}^{(M+L) \times d} \quad \text{concat memory} \\
 & \mathbf{q}_{\tau}^n, \mathbf{k}_{\tau}^n, \mathbf{v}_{\tau}^n = \mathbf{h}_{\tau}^{n-1} \mathbf{W}_q^n, \tilde{\mathbf{h}}_{\tau}^{n-1} \mathbf{W}_{k,E}^n, \tilde{\mathbf{h}}_{\tau}^{n-1} \mathbf{W}_v^n \quad \text{attention head} \\
 \text{calculate attention} \quad & \mathbf{A}_{\tau,i,j}^n = \mathbf{q}_{\tau,i}^n \mathbf{k}_{\tau,j}^n + \mathbf{q}_{\tau,i}^n \mathbf{W}_{k,R}^n \mathbf{R}_{i-j} + u^{\top} \mathbf{k}_{\tau,j} + v^{\top} \mathbf{W}_{k,R}^n \mathbf{R}_{i-j} \\
 & \mathbf{a}_{\tau}^n = \text{Masked-Softmax}(\mathbf{A}_{\tau}^n) \mathbf{v}_{\tau}^n \quad q \in \mathbb{R}^{L \times d}, k, v, R \in \mathbb{R}^{(M+L) \times d} \\
 & \mathbf{o}_{\tau}^n = \text{LayerNorm}(\text{Linear}(\mathbf{a}_{\tau}^n) + \mathbf{h}_{\tau}^{n-1}) \\
 & \mathbf{h}_{\tau}^n = \text{Positionwise-Feed-Forward}(\mathbf{o}_{\tau}^n)
 \end{aligned}$$

附录：对有相对位置编码的注意力的高效运算

$\mathbb{R}^{d \times d} \quad \mathbb{R}^{d \times 1}$

- 对每一对 (i, j) 计算 $W_{k,R}R_{i-j}$ 是一种平方成本，不用每一对 (i, j) 都计算。把所有可能的 $i - j$ 计算好，对于不同的 $query_i$ 平移就好了。

$$A_{i,j}^{\text{rel}} = \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(a)} + \underbrace{\mathbf{E}_{x_i}^\top \mathbf{W}_q^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(b)} + \underbrace{\mathbf{u}^\top \mathbf{W}_{k,E} \mathbf{E}_{x_j}}_{(c)} + \underbrace{\mathbf{v}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{i-j}}_{(d)}.$$

- 相对距离 $i - j$ ，只能是0到 $M + L - 1$ 之间的整数， M 是memory的长度， L 是segment的长度。

附录：对有相对位置编码的注意力的高效运算

定义Q如下，注意到Q已经包含了 $\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_{i-j}$ 中每一对 (i, j) 可能产生的输出向量了

$$\mathbf{Q} := \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{M+L-1}^\top \\ \mathbf{R}_{M+L-2}^\top \\ \vdots \\ \mathbf{R}_1^\top \\ \mathbf{R}_0^\top \end{bmatrix} \mathbf{W}_{k,R}^\top = \begin{bmatrix} [\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_{M+L-1}]^\top \\ [\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_{M+L-2}]^\top \\ \vdots \\ [\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_1]^\top \\ [\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_0]^\top \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(M+L) \times d}$$

consist of all possible vector outputs of $\mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_{i-j}$ for any (i, j) . Note that we have defined \mathbf{Q} in a **reversed order**, i.e., $\mathbf{Q}_k = \mathbf{W}_{k,R}\mathbf{R}_{M+L-1-k}$, to make further discussion easier.

附录：对有相对位置编码的注意力的高效运算

将注意力算式的b项展开，展开为 $L \times (M + L)$ 注意力矩阵，如下：

Next, we collect the term (b) for all possible i, j into the following $L \times (M + L)$ matrix,

Query: L
Key: M+L

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} q_0^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_M & \cdots & q_0^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_0 & 0 & \cdots & 0 \\ q_1^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{M+1} & \cdots & q_1^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_1 & q_1^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{L-1}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{M+L-1} & \cdots & q_{L-1}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{M+L-1} & q_{L-1}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_{L-1} & \cdots & q_{L-1}^\top \mathbf{W}_{k,R} \mathbf{R}_0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} q_0^\top \mathbf{Q}_{L-1} & \cdots & q_0^\top \mathbf{Q}_{M+L-1} & 0 & \cdots & 0 \\ q_1^\top \mathbf{Q}_{L-2} & \cdots & q_1^\top \mathbf{Q}_{M+L-2} & q_1^\top \mathbf{Q}_{M+L-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{L-1}^\top \mathbf{Q}_0 & \cdots & q_{L-1}^\top \mathbf{Q}_M & q_{L-1}^\top \mathbf{Q}_{M+1} & \cdots & q_{L-1}^\top \mathbf{Q}_{M+L-1} \end{bmatrix}$$

附录：对有相对位置编码的注意力的高效运算

- 定义 $\tilde{B} = qQ^\top$ 。将 \tilde{B} 的每一行分别向左移动即可得到 B 。

$$\tilde{B} = qQ^\top = \begin{bmatrix} q_0^\top Q_0 & \cdots & q_0^\top Q_M & q_0^\top Q_{M+1} & \cdots & q_0^\top Q_{M+L-1} \\ q_1^\top Q_0 & \cdots & q_1^\top Q_M & q_1^\top Q_{M+1} & \cdots & q_1^\top Q_{M+L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{L-1}^\top Q_0 & \cdots & q_{L-1}^\top Q_M & q_{L-1}^\top Q_{M+1} & \cdots & q_{L-1}^\top Q_{M+L-1} \end{bmatrix}.$$

- 用同样的方式简化d项的运算。
- 主要的计算成本来自于 qQ^\top ，正比于 $L \times (M + L) \times d$
- 注：按照定义进行矩阵乘法的时间复杂度是 $O(abc)$

The End !

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/92017824>
<https://www.zhihu.com/question/347678607>
<https://www.zhihu.com/question/350116316>