

Helei's Tech Notes (index.html)

≡ Helei's Tech Notes

技术

[Flask , 从简单开始 \(15013781349463.html\)](#)

[Apache 配置文件解释 \(14698086378177.html\)](#)

[shared_ptr 原理及事故 \(14696398760857.html\)](#)

[Git \(14696393471602.html\)](#)

算法

[SVD在图像处理中的基本应用 \(15084626290253.html\)](#)

[fastText 源码分析 \(14732610572844.html\)](#)

[SVM 推导 \(14698080869715.html\)](#)

[神经网络计算模型 - 理论解释 \(14696391071598.html\)](#)

[WSABIE 算法解释 \(14696374110477.html\)](#)

想法

[如何学习新技术 \(14953815607558.html\)](#)

fastText 源码分析

介绍

fastText (<https://github.com/facebookresearch/fastText>) 是 facebook 近期开源的一个词向量计算以及文本分类工具，该工具的理论基础是以下两篇论文：

Enriching Word Vectors with Subword Information (<https://arxiv.org/pdf/1607.04606v1.pdf>)

这篇论文提出了用 word n-gram 的向量之和来代替简单的词向量的方法，以解决简单 word2vec 无法处理同一词的不同形态的问题。fastText 中提供了 maxn 这个参数来确定 word n-gram 的 n 的大小。

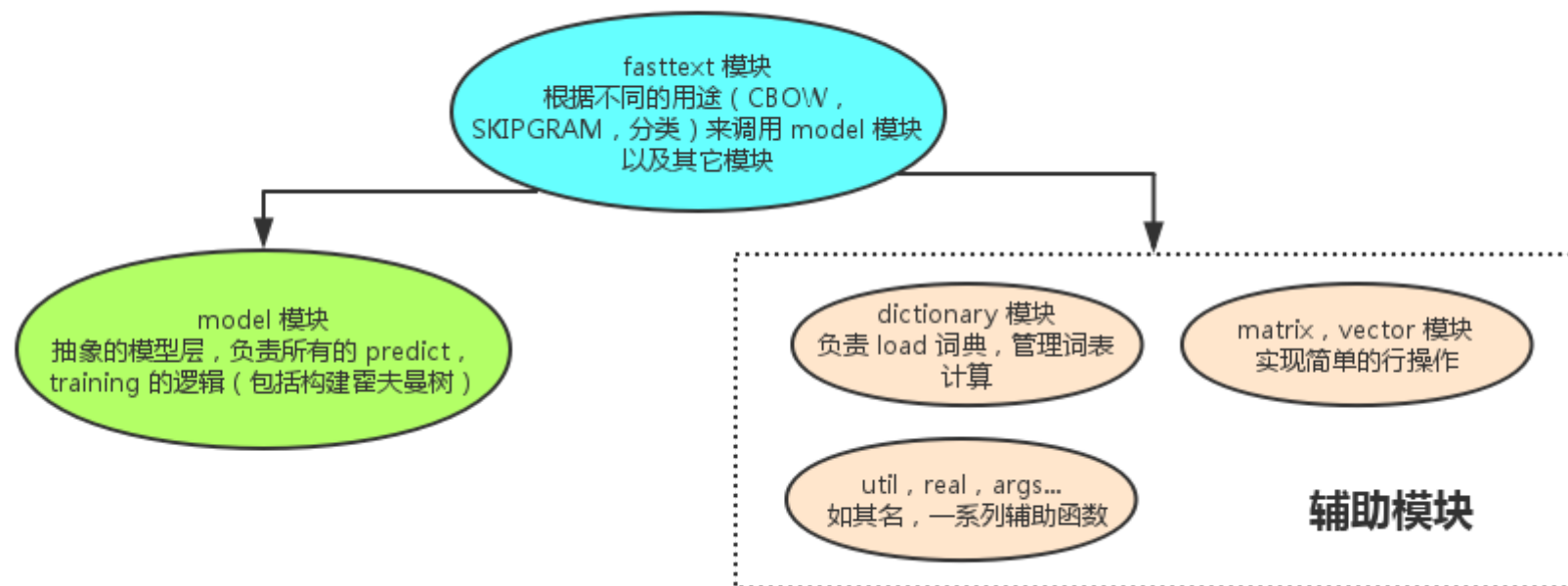
Bag of Tricks for Efficient Text Classification (<https://arxiv.org/pdf/1607.01759v2.pdf>)

这篇论文提出了 fastText 算法，该算法实际上是将目前用来算 word2vec 的网络架构做了个小修改，原先使用一个词的上下文的所有词向量之和来预测词本身（CBOW 模型），现在改为用一段短文本的词向量之和来对文本进行分类。

在我看来，fastText 的价值是提供了一个 **更具可读性，模块化程度较好** 的 word2vec 的实现，附带一些新的分类功能，本文详细分析它的源码。

顶层结构

fastText 的代码结构以及各模块的功能如下图所示：



分析各模块时，我只会解释该模块的 **主要调用路径** 下的源码，以 **注释** 的方式说明，其它的功能性代码请大家自行阅读。如果对 word2vec 的理论和相关术语不了解，请先阅读这篇 word2vec 中的数学原理详解 (<http://www.cnblogs.com/pegoty/p/3857839.html>)。

训练数据格式

训练数据格式为一行一个句子，每个词用空格分割，如果一个词带有前缀“`__label__`”，那么它就作为一个类标签，在文本分类时使用，这个前缀可以通过 `-label` 参数自定义。训练文件支持 UTF-8 格式。

fasttext 模块

fasttext 是最顶层的模块，它的主要功能是 `训练` 和 `预测`，首先是 `训练` 功能的调用路径，第一个函数是 `train`，它的主要作用是 **初始化参数，启动多线程训练**，请大家留意源码中的相关部分。

```

void FastText::train(std::shared_ptr<Args> args) {
    args_ = args;
    dict_ = std::make_shared<Dictionary>(args_);
    std::ifstream ifs(args_>input);
    if (!ifs.is_open()) {
        std::cerr << "Input file cannot be opened!" << std::endl;
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
    // 根据输入文件初始化词典
    dict_>readFromFile(ifs);
    ifs.close();

    // 初始化输入层, 对于普通 word2vec, 输入层就是一个词向量的查找表,
    // 所以它的大小为 nwords 行, dim 列 (dim 为词向量的长度), 但是 fastText 用了
    // word n-gram 作为输入, 所以输入矩阵的大小为 (nwords + ngram 种类) * dim
    // 代码中, 所有 word n-gram 都被 hash 到固定数目的 bucket 中, 所以输入矩阵的大小为
    // (nwords + bucket 个数) * dim
    input_ = std::make_shared<Matrix>(dict_>nwords()+args_>bucket, args_>dim);

    // 初始化输出层, 输出层无论是用负采样, 层次 softmax, 还是普通 softmax,
    // 对于每种可能的输出, 都有一个 dim 维的参数向量与之对应
    // 当 args_>model == model_name::sup 时, 训练分类器,
    // 所以输出的种类是标签总数 dict_>nlabels()
    if (args_>model == model_name::sup) {
        output_ = std::make_shared<Matrix>(dict_>nlabels(), args_>dim);
    } else {
        // 否则训练的是词向量, 输出种类就是词的种类 dict_>nwords()
        output_ = std::make_shared<Matrix>(dict_>nwords(), args_>dim);
    }
    input_>uniform(1.0 / args_>dim);
    output_>zero();

    start = clock();
    tokenCount = 0;

    // 库采用 C++ 标准库的 thread 来实现多线程
    std::vector<std::thread> threads;
    for (int32_t i = 0; i < args_>thread; i++) {

```

```

    // 实际的训练发生在 trainThread 中
    threads.push_back(std::thread( [=]() { trainThread(i); }));
}
for (auto it = threads.begin(); it != threads.end(); ++it) {
    it->join();
}

// Model 的所有参数 (input_, output_) 是在初始化时由外界提供的,
// 此时 input_ 和 output_ 已经处于训练结束的状态
model_ = std::make_shared<Model>(input_, output_, args_, 0);

saveModel();
if (args_->model != model_name::sup) {
    saveVectors();
}
}

```

下面，我们进入 `trainThread` 函数，看看训练的主体逻辑，该函数的主要工作是 **实现了标准的随机梯度下降**，并随着训练的进行逐步降低学习率。

```

void FastText::trainThread(int32_t threadId) {

    std::ifstream ifs(args_->input);
    // 根据线程数，将训练文件按照总字节数 (utils::size) 均分成多个部分
    // 这么做的一个后果是，每一部分的第一个词有可能从中间被切断，
    // 这样的"小噪音"对于整体的训练结果无影响
    utils::seek(ifs, threadId * utils::size(ifs) / args_->thread);

    Model model(input_, output_, args_, threadId);
    if (args_->model == model_name::sup) {
        model.setTargetCounts(dict_->getCounts(entry_type::label));
    } else {
        model.setTargetCounts(dict_->getCounts(entry_type::word));
    }

    // 训练文件中的 token 总数
    const int64_t ntokens = dict_->ntokens();
    // 当前线程处理完毕的 token 总数
    int64_t localTokenCount = 0;
    std::vector<int32_t> line, labels;
    // tokenCount 为所有线程处理完毕的 token 总数
    // 当处理了 args_->epoch 遍所有 token 后，训练结束
    while (tokenCount < args_->epoch * ntokens) {
        // progress = 0 ~ 1, 代表当前训练进程，随着训练的进行逐渐增大
        real progress = real(tokenCount) / (args_->epoch * ntokens);
        // 学习率根据 progress 线性下降
        real lr = args_->lr * (1.0 - progress);
        localTokenCount += dict_->getLine(ifs, line, labels, model.rng);
        // 根据训练需求的不同，这里用的更新策略也不同，它们分别是：
        // 1. 有监督学习（分类）
        if (args_->model == model_name::sup) {
            dict_->addNgrams(line, args_->wordNgrams);
            supervised(model, lr, line, labels);
        } // 2. word2vec (CBOW)
        } else if (args_->model == model_name::cbow) {
            cbow(model, lr, line);
        } // 3. word2vec (SKIPGRAM)
        } else if (args_->model == model_name::sg) {

```

```

        skipgram(model, lr, line);
    }
    // args_->lrUpdateRate 是每个线程学习率的变化率，默认为 100，
    // 它的作用是，每处理一定的行数，再更新全局的 tokenCount 变量，从而影响学习率
    if (localTokenCount > args_->lrUpdateRate) {
        tokenCount += localTokenCount;
        // 每次更新 tokenCount 后，重置计数
        localTokenCount = 0;
        // 0 号线程负责将训练进度输出到屏幕
        if (threadId == 0) {
            printInfo(progress, model.getLoss());
        }
    }
}
if (threadId == 0) {
    printInfo(1.0, model.getLoss());
    std::cout << std::endl;
}
ifs.close();
}

```

一哄而上的并行训练：每个训练线程在更新参数时并没有加锁，这会给参数更新带来一些噪音，但是不会影响最终的结果。无论是 google 的 word2vec 实现，还是 fastText 库，都没有加锁。

从 `trainThread` 函数中我们发现，实际的模型更新策略发生在 `supervised`，`cbow`，`skipgram` 三个函数中，这三个函数都调用同一个 `model.update` 函数来更新参数，这个函数属于 `model` 模块，但在这里我先简单介绍它，以方便大家理解代码。

update 函数的原型为

```
void Model::update(const std::vector<int32_t>& input, int32_t target, real lr)
```

该函数有三个参数，分别是“输入”，“类标签”，“学习率”。

- 输入是一个 `int32_t` 数组，每个元素代表一个词在 dictionary 里的 ID。对于分类问题，这个数组代表输入的短文本，对于 word2vec，这个数组代表一个词的上下文。

- 类标签是一个 `int32_t` 变量。对于 word2vec 来说，它就是带预测的词的 ID，对于分类问题，它就是类的 label 在 dictionary 里的 ID。因为 label 和词在词表里一起存放，所以有统一的 ID 体系。

下面，我们回到 fasttext 模块的三个更新函数：


```

void FastText::supervised(Model& model, real lr,
                        const std::vector<int32_t>& line,
                        const std::vector<int32_t>& labels) {
    if (labels.size() == 0 || line.size() == 0) return;
    // 因为一个句子可以打上多个 label, 但是 fastText 的架构实际上只有支持一个 label
    // 所以这里随机选择一个 label 来更新模型, 这样做会让其它 label 被忽略
    // 所以 fastText 不太适合做多标签的分类
    std::uniform_int_distribution<> uniform(0, labels.size() - 1);
    int32_t i = uniform(model.rng);
    model.update(line, labels[i], lr);
}

void FastText::cbow(Model& model, real lr,
                    const std::vector<int32_t>& line) {
    std::vector<int32_t> bow;
    std::uniform_int_distribution<> uniform(1, args_->ws);

    // 在一个句子中, 每个词可以进行一次 update
    for (int32_t w = 0; w < line.size(); w++) {
        // 一个词的上下文长度是随机产生的
        int32_t boundary = uniform(model.rng);
        bow.clear();
        // 以当前词为中心, 将左右 boundary 个词加入 input
        for (int32_t c = -boundary; c <= boundary; c++) {
            // 当然, 不能数组越界
            if (c != 0 && w + c >= 0 && w + c < line.size()) {
                // 实际被加入 input 的不止是词本身, 还有词的 word n-gram
                const std::vector<int32_t>& ngrams = dict_->getNgrams(line[w + c]);
                bow.insert(bow.end(), ngrams.cbegin(), ngrams.cend());
            }
        }
        // 完成一次 CBOW 更新
        model.update(bow, line[w], lr);
    }
}

void FastText::skipgram(Model& model, real lr,
                        const std::vector<int32_t>& line) {

```

```

std::uniform_int_distribution<> uniform(1, args_>ws);
for (int32_t w = 0; w < line.size(); w++) {
    // 一个词的上下文长度是随机产生的
    int32_t boundary = uniform(model.rng);
    // 采用词+word n-gram 来预测这个词的上下文的所有的词
    const std::vector<int32_t>& ngrams = dict_>getNgrams(line[w]);
    // 在 skipgram 中, 对上下文的每一个词分别更新一次模型
    for (int32_t c = -boundary; c <= boundary; c++) {
        if (c != 0 && w + c >= 0 && w + c < line.size()) {
            model.update(ngrams, line[w + c], lr);
        }
    }
}
}

```

训练部分的代码已经分析完毕，预测部分的代码就简单多了，它的主要逻辑都在 `model.predict` 函数里。

```

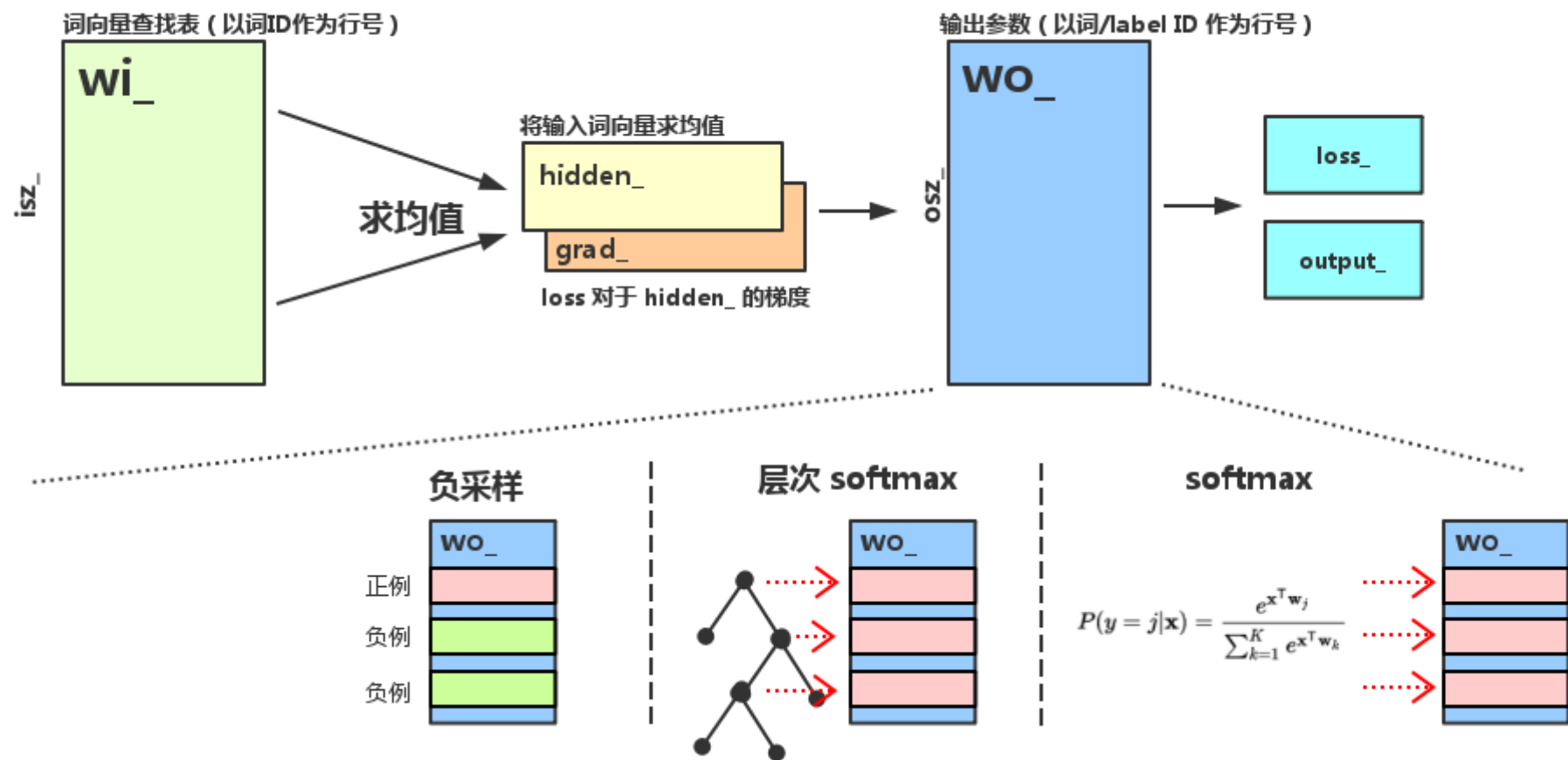
void FastText::predict(const std::string& filename, int32_t k, bool print_prob) {
    std::vector<int32_t> line, labels;
    std::ifstream ifs(filename);
    if (!ifs.is_open()) {
        std::cerr << "Test file cannot be opened!" << std::endl;
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
    while (ifs.peek() != EOF) {
        // 读取输入文件的每一行
        dict_->getLine(ifs, line, labels, model_->rng);
        // 将一个词的 n-gram 加入词表, 用于处理未登录词。(即便一个词不在词表里, 我们也可以用它的 word n-gram 来预测一个结果)
        dict_->addNgrams(line, args_->wordNgrams);
        if (line.empty()) {
            std::cout << "n/a" << std::endl;
            continue;
        }
        std::vector<std::pair<real, int32_t>> predictions;
        // 调用 model 模块的预测接口, 获取 k 个最可能的分类
        model_->predict(line, k, predictions);
        // 输出结果
        for (auto it = predictions.cbegin(); it != predictions.cend(); it++) {
            if (it != predictions.cbegin()) {
                std::cout << ' ';
            }
            std::cout << dict_->getLabel(it->second);
            if (print_prob) {
                std::cout << ' ' << exp(it->first);
            }
        }
        std::cout << std::endl;
    }
    ifs.close();
}

```

通过对 fasttext 模块的分析, 我们发现它最核心的预测和更新逻辑都在 model 模块中, 接下来, 我们进入 model 模块一探究竟。

model 模块

model 模块对外提供的服务可以分为 `update` 和 `predict` 两类，下面我们分别对它们进行分析。由于这里的参数较多，我们先以图示标明各个参数在模型中所处的位置，以免各位混淆。



图中所有变量的名字全部与 `model` 模块中的名字保持一致，注意到 `wo_` 矩阵在不同的输出层结构中扮演着不同的角色。

update

update 函数的作用已经在前面介绍过，下面我们看一下它的实现：

```

void Model::update(const std::vector<int32_t>& input, int32_t target, real lr) {
    // target 必须在合法范围内
    assert(target >= 0);
    assert(target < osz_);
    if (input.size() == 0) return;
    // 计算前向传播：输入层 -> 隐层
    hidden_.zero();
    for (auto it = input.cbegin(); it != input.cend(); ++it) {
        // hidden_ 向量保存输入词向量的均值，
        // addRow 的作用是将 wi_ 矩阵的第 *it 列加到 hidden_ 上
        hidden_.addRow(*wi_, *it);
    }
    // 求和后除以输入词个数，得到均值向量
    hidden_.mul(1.0 / input.size());

    // 根据输出层的不同结构，调用不同的函数，在各个函数中，
    // 不仅通过前向传播算出了 loss_，还进行了反向传播，计算出了 grad_，后面逐一分析。
    // 1. 负采样
    if (args_->loss == loss_name::ns) {
        loss_ += negativeSampling(target, lr);
    } else if (args_->loss == loss_name::hs) {
        // 2. 层次 softmax
        loss_ += hierarchicalSoftmax(target, lr);
    } else {
        // 3. 普通 softmax
        loss_ += softmax(target, lr);
    }
    nexamples_ += 1;

    // 如果是在训练分类器，就将 grad_ 除以 input_ 的大小
    // 原因不明
    if (args_->model == model_name::sup) {
        grad_.mul(1.0 / input.size());
    }
    // 反向传播，将 hidden_ 上的梯度传播到 wi_ 上的对应行
    for (auto it = input.cbegin(); it != input.cend(); ++it) {
        wi_->addRow(grad_, *it, 1.0);
    }
}

```

```
}  
}
```

下面我们看看三种输出层对应的更新函数：`negativeSampling`，`hierarchicalSoftmax`，`softmax`。

`model` 模块中最有意思的部分就是将层次 softmax 和负采样统一抽象成多个二元 logistic regression 计算。

如果使用负采样，训练时每次选择一个正样本，随机采样几个负样本，每种输出都对应一个参数向量，保存于 `wo_` 的各行。对所有样本的参数更新，都是一次独立的 LR 参数更新。

如果使用层次 softmax，对于每个目标词，都可以在构建好的霍夫曼树上确定一条从根节点到叶节点的路径，路径上的每个非叶节点都是一个 LR，参数保存在 `wo_` 的各行上，训练时，这条路径上的 LR 各自独立进行参数更新。

无论是负采样还是层次 softmax，在神经网络的计算图中，所有 LR 都会依赖于 `hidden_` 的值，所以 `hidden_` 的梯度 `grad_` 是各个 LR 的反向传播的梯度的累加。

LR 的代码如下：

```
real Model::binaryLogistic(int32_t target, bool label, real lr) {  
    // 将 hidden_ 和参数矩阵的第 target 行做内积，并计算 sigmoid  
    real score = utils::sigmoid(wo_->dotRow(hidden_, target));  
    // 计算梯度时的中间变量  
    real alpha = lr * (real(label) - score);  
    // Loss 对于 hidden_ 的梯度累加到 grad_ 上  
    grad_.addRow(*wo_, target, alpha);  
    // Loss 对于 LR 参数的梯度累加到 wo_ 的对应行上  
    wo_->addRow(hidden_, target, alpha);  
    // LR 的 Loss  
    if (label) {  
        return -utils::log(score);  
    } else {  
        return -utils::log(1.0 - score);  
    }  
}
```

经过以上的分析，下面三种逻辑就比较容易理解了：


```

real Model::negativeSampling(int32_t target, real lr) {
    real loss = 0.0;
    grad_.zero();
    for (int32_t n = 0; n <= args_->neg; n++) {
        // 对于正样本和负样本，分别更新 LR
        if (n == 0) {
            loss += binaryLogistic(target, true, lr);
        } else {
            loss += binaryLogistic(getNegative(target), false, lr);
        }
    }
    return loss;
}

```

```

real Model::hierarchicalSoftmax(int32_t target, real lr) {
    real loss = 0.0;
    grad_.zero();
    // 先确定霍夫曼树上的路径
    const std::vector<bool>& binaryCode = codes[target];
    const std::vector<int32_t>& pathToRoot = paths[target];
    // 分别对路径上的中间节点做 LR
    for (int32_t i = 0; i < pathToRoot.size(); i++) {
        loss += binaryLogistic(pathToRoot[i], binaryCode[i], lr);
    }
    return loss;
}

```

// 普通 softmax 的参数更新

```

real Model::softmax(int32_t target, real lr) {
    grad_.zero();
    computeOutputSoftmax();
    for (int32_t i = 0; i < osz_; i++) {
        real label = (i == target) ? 1.0 : 0.0;
        real alpha = lr * (label - output_[i]);
        grad_.addRow(*wo_, i, alpha);
        wo_->addRow(hidden_, i, alpha);
    }
}

```

```
    return -utils::log(output_[target]);  
}
```

predict

predict 函数可以用于给输入数据打上 1 ~ K 个类标签，并输出各个类标签对应的概率值，对于层次 softmax，我们需要遍历霍夫曼树，找到 top - K 的结果，对于普通 softmax（包括负采样和 softmax 的输出），我们需要遍历结果数组，找到 top - K。

```

void Model::predict(const std::vector<int32_t>& input, int32_t k, std::vector<std::pair<real, int32_t>>& heap) {
    assert(k > 0);
    heap.reserve(k + 1);
    // 计算 hidden_
    computeHidden(input);

    // 如果是层次 softmax, 使用 dfs 遍历霍夫曼树的所有叶子节点, 找到 top - k 的概率
    if (args_->loss == loss_name::hs) {
        dfs(k, 2 * osz_ - 2, 0.0, heap);
    } else {
        // 如果是普通 softmax, 在结果数组里找到 top-k
        findKBest(k, heap);
    }
    // 对结果进行排序后输出
    // 因为 heap 中虽然一定是 top-k, 但并没有排好序
    std::sort_heap(heap.begin(), heap.end(), comparePairs);
}

void Model::findKBest(int32_t k, std::vector<std::pair<real, int32_t>>& heap) {
    // 计算结果数组
    computeOutputSoftmax();
    for (int32_t i = 0; i < osz_; i++) {
        if (heap.size() == k && utils::log(output_[i]) < heap.front().first) {
            continue;
        }
        // 使用一个堆来保存 top - k 的结果, 这是算 top-k 的标准做法
        heap.push_back(std::make_pair(utils::log(output_[i]), i));
        std::push_heap(heap.begin(), heap.end(), comparePairs);
        if (heap.size() > k) {
            std::pop_heap(heap.begin(), heap.end(), comparePairs);
            heap.pop_back();
        }
    }
}

void Model::dfs(int32_t k, int32_t node, real score, std::vector<std::pair<real, int32_t>>& heap) {
    if (heap.size() == k && score < heap.front().first) {
        return;
    }

```

```

}

if (tree[node].left == -1 && tree[node].right == -1) {
    // 只输出叶子节点的结果
    heap.push_back(std::make_pair(score, node));
    std::push_heap(heap.begin(), heap.end(), comparePairs);
    if (heap.size() > k) {
        std::pop_heap(heap.begin(), heap.end(), comparePairs);
        heap.pop_back();
    }
    return;
}

// 将 score 累加后递归向下收集结果
real f = utils::sigmoid(wo_>dotRow(hidden_, node - osz_));
dfs(k, tree[node].left, score + utils::log(1.0 - f), heap);
dfs(k, tree[node].right, score + utils::log(f), heap);
}

```

其它模块

除了以上两个模块，dictionary 模块也相当重要，它完成了训练文件载入，哈希表构建，word n-gram 计算等功能，但是并没有太多算法在里面。

其它模块例如 Matrix, Vector 也只是封装了简单的矩阵向量操作，这里不再做详细分析。

附录：构建霍夫曼树算法分析

在学信息论的时候接触过构建 Huffman 树的算法，课本中的方法描述往往是：

找到当前权重最小的两个子树，将它们合并

算法的性能取决于如何实现这个逻辑。网上的很多实现都是在新增节点都时遍历一次当前所有的树，这种算法的复杂度是 $O(n^2)$ ，性能很差。

聪明一点的方法是用一个优先级队列来保存当前所有的树，每次取 top 2，合并，加回队列。这个算法的复杂度是 $O(n \log n)$ ，缺点是必需使用额外的数据结构，而且进堆出堆的操作导致常数项较大。

word2vec 以及 fastText 都采用了一种更好的方法，时间复杂度是 $O(n \log n)$ ，只用了一次排序，一次遍历，简洁优美，但是要理解它需要进行一些推理。

算法如下：

```

void Model::buildTree(const std::vector<int64_t>& counts) {
    // counts 数组保存每个叶子节点的词频，降序排列
    // 分配所有节点的空间
    tree.resize(2 * osz_ - 1);
    // 初始化节点属性
    for (int32_t i = 0; i < 2 * osz_ - 1; i++) {
        tree[i].parent = -1;
        tree[i].left = -1;
        tree[i].right = -1;
        tree[i].count = 1e15;
        tree[i].binary = false;
    }
    for (int32_t i = 0; i < osz_; i++) {
        tree[i].count = counts[i];
    }
    // leaf 指向当前未处理的叶子节点的最后一个，也就是权值最小的叶子节点
    int32_t leaf = osz_ - 1;
    // node 指向当前未处理的非叶子节点的第一个，也是权值最小的非叶子节点
    int32_t node = osz_;
    // 逐个构造所有非叶子节点 (i >= osz_, i < 2 * osz - 1)
    for (int32_t i = osz_; i < 2 * osz_ - 1; i++) {
        // 最小的两个节点的下标
        int32_t mini[2];

        // 计算权值最小的两个节点，候选只可能是 leaf, leaf - 1,
        // 以及 node, node + 1
        for (int32_t j = 0; j < 2; j++) {
            // 从这四个候选里找到 top-2
            if (leaf >= 0 && tree[leaf].count < tree[node].count) {
                mini[j] = leaf--;
            } else {
                mini[j] = node++;
            }
        }
        // 更新非叶子节点的属性
        tree[i].left = mini[0];
        tree[i].right = mini[1];
        tree[i].count = tree[mini[0]].count + tree[mini[1]].count;
    }
}

```

```

    tree[mini[0]].parent = i;
    tree[mini[1]].parent = i;
    tree[mini[1]].binary = true;
}
// 计算霍夫曼编码
for (int32_t i = 0; i < osz_; i++) {
    std::vector<int32_t> path;
    std::vector<bool> code;
    int32_t j = i;
    while (tree[j].parent != -1) {
        path.push_back(tree[j].parent - osz_);
        code.push_back(tree[j].binary);
        j = tree[j].parent;
    }
    paths.push_back(path);
    codes.push_back(code);
}
}

```

算法首先对输入的叶子节点进行一次排序（ $O(n\log n)$ ），然后确定两个下标 `leaf` 和 `node`，`leaf` 总是指向当前最小的叶子节点，`node` 总是指向当前最小的非叶子节点，所以，最小的两个节点可以从 `leaf`, `leaf - 1`, `node`, `node + 1` 四个位置中取得，时间复杂度 $O(1)$ ，每个非叶子节点都进行一次，所以总复杂度为 $O(n)$ ，算法整体复杂度为 $O(n\log n)$ 。

[« 如何学习新技术 \(14953815607558.html\)](#)

[Apache 配置文件解释 » \(14698086378177.html\)](#)



Like

Issue Page (undefined)

([https://github.com/login/oauth/authorize?](https://github.com/login/oauth/authorize?scope=public_repo&redirect_uri=https%3A%2F%2Fheleifz.github.io%2F14732610572844.html%3Fhmsr%3Dtoutiao.io&client_id=7deba80f1937ef31e6d3&client_secret=c7c185503c849fe0f61b3af65c78a0d1f6fbfd5a)

[scope=public_repo&redirect_uri=https%3A%2F%2Fheleifz.github.io%2F14732610572844.html%3Fhmsr%3Dtoutiao.io&client_id=7deba80f1937ef31e6d3&client_secret=c7c185503c849fe0f61b3af65c78a0d1f6fbfd5a](https://github.com/login/oauth/authorize?scope=public_repo&redirect_uri=https%3A%2F%2Fheleifz.github.io%2F14732610572844.html%3Fhmsr%3Dtoutiao.io&client_id=7deba80f1937ef31e6d3&client_secret=c7c185503c849fe0f61b3af65c78a0d1f6fbfd5a)

Write

Preview

Leave a comment

Styling with Markdown is supported (<https://guides.github.com/features/mastering-markdown/>)

Comment

Powered by Gitment (<https://github.com/imsun/gitment>)