

基于用户行为分析的个性化推荐算法

贾俊¹, 张斌¹, 李志远¹, 魏玮¹, 魏浩²

(1. 青岛海尔(胶州)空调器有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东科技大学计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 随着商业智能系统和数据挖掘技术的发展, 用户的行为数据对企业决策产生了重要的影响。网络电子商务平台可以利用这些数据分析后的结果, 对特定的用户推送他们感兴趣的商品, 这样能增强用户黏度, 提高平台的商业价值。提出一种基于用户行为分析的个性化推荐算法, 将用户的行为信息转化为用户评分矩阵, 且提出一种改进的正则化非负矩阵分解算法, 在原始正则化非负矩阵分解算法的基础上加入偏置信息。改进算法充分挖掘用户在网页上点击、购买、浏览、收藏等行为信息, 将用户感兴趣的商品及时推送给用户。实验结果验证了本文所提出的两种算法的有效性和高效性。

关键词: 行为分析; 非负矩阵分解; 偏置; 个性化推荐

中图分类号: TP391.3

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-6652.201947

Personalized recommendation algorithm based on user behavior analysis

JIA Jun¹, ZHANG Bin¹, LI Zhiyuan¹, WEI Wei¹, WEI Hao²

1. Qingdao Haier (Jiaozhou) Air Conditioner Co., Ltd., Qingdao 266000, China

2. School of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: With the development of business intelligence system and data mining technology, user behavior data has an important impact on enterprise decision-making. For the network e-commerce platform, the results of these data analysis can be used to push items of interest to specific users, which can enhance the user experience and the business value of the platform. A personalized recommendation algorithm based on user behavior analysis was proposed, which transforms user behavior information into user rating matrix, and an improved regularized nonnegative matrix decomposition algorithm was also proposed, which adds bias information to the original regularized nonnegative matrix decomposition. This algorithm can fully mine the user behavior information such as click, purchase, browse, collect, etc., and actively push the items of interest to the users. The experimental results verify the effectiveness and efficiency of the algorithm.

Key words: behavior analysis, nonnegative matrix decomposition, bias, personalized recommendation

1 引言

随着互联网与信息技术的飞速发展, 互联网用户数呈指数增长。用户倾向于通过互联网在线选购心仪的商品。据统计, 2019年天猫双十一最终成交额为2 684亿元, 如何从海量数据中快速获取所需

数据, 更好地为用户提供服务, 一直是学术界与产业界的研究热点。在用户无法准确描述自己真正的需求及偏好时, 传统的推荐系统无法为用户推荐其喜欢的商品, 这会导致大量用户的流失。获得用户的评分数据时, 可以使用协同过滤推荐技术为用户自动推荐商品, 但是与评分数据相比, 用户在网络

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2019-11-22

通信作者: 魏浩, 1791414347@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(No. 2017YFE0101600)

Foundation Item: National Key Research and Development Project(No. 2017YFE0101600)

上的点击、购买等行为数据更容易被获取,因此本文提出一种基于用户偏好程度的模型构建方法,通过用户的点击、购买、浏览、收藏等行为信息自动构建用户评分矩阵。

协同过滤推荐技术是通过用户评分矩阵,根据相似用户的喜好或者通过相似物品来进行推荐。由于每个用户只可能与有限个商品有过交互行为,因此这个评分矩阵通常非常稀疏。如果可以估计评分矩阵中的空缺值,那么就可以知道用户对该商品的喜好程度,从而可以为用户自动推荐其喜爱的商品。矩阵分解(matrix-factorization, MF)^[1]是一种填充空缺值的有效方式,其基本思想是将原始矩阵分解为两个低秩矩阵,然后利用这两个矩阵来重构原始矩阵的同时填充原始矩阵中的空缺值。但是 MF 的方法会使得重构后的矩阵含有负数,这不符合评分矩阵的物理含义,因此文献[2-3]将非负约束引入 MF 过程中,提出了非负矩阵分解(nonnegative matrix factorization, NMF)算法,该算法在更新每个参数的过程中,通过重新调整学习率来抵消负值部分,因此只剩下非负的部分。但是在用户评分矩阵中,已知评分个数远远小于空缺评分个数,因此,如果不进行适当的参数调整,NMF 过程就无法对矩阵进行有效恢复。文献[4]指出参数调整过程可以通过在 NMF 过程中引入最大期望(expectation maximization, EM)算法或指标矩阵来实现,但是这种方式会大大增加计算复杂度。文献[5-7]指出正则化是提高基于 MF 的协同过滤模型的有效方式。

本文的主要创新点如下。

- 提出了一种用户偏好程度模型构建方法,通过将点击、购买、浏览、收藏等用户行为转化为用户对物品的偏好程度,构建用户评分矩阵。
- 提出了一种改进的正则化非负矩阵分解(bias_RSNMF)算法,在原始正则化非负矩阵分解的基础上加入了偏置信息,可以准确恢复用户评分矩阵,从而提高为用户自动推荐喜好商品的精度。

本文剩余的部分安排如下:第 2 节详细介绍了用户偏好程度模型构建方法与改进的正则化非负矩阵分解算法,第 3 节介绍本文所提出的基于用户行为分析的个性化推荐算法的实验结果,第 4 节对本文的工作进行总结与展望。

2 基于用户行为分析的个性化推荐算法

首先介绍用户偏好程度模型的构建方法,通过

该方法可以将用户在网络上的行为数据转为用户评分矩阵(但是该矩阵中含有大量空缺值);然后通过加入偏置的正则化非负矩阵分解方法恢复用户评分矩阵,从而获得用户对无交互行为的物品的喜好程度。

2.1 用户偏好程度模型构建方法

在用户的行为特征中,共有 5 种行为数据,分别为: type_a 点击、type_b 加购、type_c 购买、type_d 收藏和 type_e 浏览。其中购买行为基本表示用户喜欢该物品,因此在偏好程度中占到最高权重,评分为 1;而加购和收藏比购买的权重稍微低一些,但是却比其他行为的权重高,所以在表达式中加大了这两种行为的权重;点击和浏览的权重最低,在表达式中选取低权重。构建用户 u 对物品 i 的喜爱程度 lo_{ui} ,如式(1)所示。

$$lo_{ui} = (type_a_{ui} + type_e_{ui}) \cdot \exp\left(\frac{type_b_{ui} + type_d_{ui}}{2} + type_c_{ui}\right) \quad (1)$$

$$Lo = \begin{bmatrix} lo_{11} & \cdots & lo_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ lo_{m1} & \cdots & lo_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,矩阵 Lo 的元素为 lo_{ui} , m 为用户数, n 为物品数, $type_c_{ui}$ 表示用户 u 对物品 i 购买行为的权重, $type_a_{ui}$, $type_e_{ui}$, $type_b_{ui}$, $type_d_{ui}$ 与 $type_c_{ui}$ 类似。

使用式(3)将用户喜好程度转换为 0~5 之间,有

$$r_{ui} = \frac{lo_{ui}}{\max(Lo)} \times 5 \quad (3)$$

其中, $\max(Lo)$ 为矩阵 Lo 的最大值。用户评分矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, r_{ui} 表示用户 u 对物品 i 的评分。

2.2 加入偏置的正则化非负矩阵分解算法

非负矩阵分解算法将矩阵 R 分解成用户特征矩阵 P (维度为用户数*隐藏特征数)和物品特征矩阵 Q (维度为隐藏特征数*物品数)相乘的形式,即 $R=PQ$ (因为 R 中含有大量空缺值,所以 R 和 PQ 之间的差距并不为零),通过最小化评分矩阵 R 和 PQ 之间的差距来得到 P 和 Q ,但是与其他协同过

滤不同, NMF 算法最终得到的用户特征矩阵和物品特征矩阵都是非负的。非负矩阵分解的目标表达式如式 (5) 所示。

$$l = \min \frac{1}{2} \sum_{u,i \in R} (r_{u,i} - p_{u \cdot} \cdot q_{\cdot i})^2 \quad (5)$$

对于这个目标表达式, 首先利用梯度下降算法得到式 (6)。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} + \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot r_{u,i} - \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \\ q_{ki} = q_{ki} + \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot r_{u,i} - \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \end{cases} \quad (6)$$

其中, p_{uk} 表示用户特征矩阵 $\mathbf{P}$ 中的第 u 行第 k 列元素, 即用户 u 的第 k 个特征; q_{ki} 表示物品特征矩阵 $\mathbf{Q}$ 中的第 k 行第 i 列元素, 即第 i 个物品的第 k 个特征; η_p 和 η_q 代表学习率; I_u 为用户 u 不为空的评分数据行, U_i 为物品 i 不为空的评分数据列。在将用户特征矩阵和物品特征矩阵初始化为非负之后, 利用式 (6) 进行训练并不能保证用户特征矩阵和物品特征矩阵在迭代过程中一直保持非负性, 因此, 将学习率定义成式 (7)。

$$\begin{cases} \eta_p = \frac{p_{uk}}{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot \hat{r}_{u,i}} \\ \eta_q = \frac{q_{ki}}{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot \hat{r}_{u,i}} \end{cases} \quad (7)$$

将式 (7) 中的学习率代入式 (6), 得到非负矩阵分解的迭代表达式, 如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} \frac{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot r_{u,i}}{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot \hat{r}_{u,i}} \\ q_{ki} = q_{ki} \frac{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot r_{u,i}}{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot \hat{r}_{u,i}} \end{cases} \quad (8)$$

利用式 (8) 进行迭代, 可以保证分解以后的用户特征矩阵和物品特征矩阵的非负性。考虑到推荐系统中的评分矩阵具有很强的稀疏性, Zhang 等人^[4]提出了基于权重的非负矩阵分解 (weighted non-negative matrix-factorization, WNMF) 算法, 其迭代表达式如式 (9) 所示。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} \frac{((\mathbf{W} \circ \mathbf{R}) \mathbf{Q}^T)_{u,k}}{((\mathbf{W} \circ \mathbf{PQ}) \mathbf{Q}^T)_{u,k}} \\ q_{ki} = q_{ki} \frac{(\mathbf{P}^T (\mathbf{W} \circ \mathbf{R}))_{k,i}}{(\mathbf{P}^T (\mathbf{W} \circ \mathbf{PQ}))_{k,i}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\circ$ 是哈达玛积, $\mathbf{W}$ 是与评分矩阵维度相同的指示矩阵, 如果评分矩阵中的一个位置是有评分的, 那么指示矩阵中的对应位置的值就为 1, 否则为 0。WNMF 算法虽然可以应对稀疏性问题, 但是其中的指示矩阵不仅占据了存储空间, 而且在训练过程中每次迭代都会花费一定的时间来进行指示矩阵与其他矩阵的乘法。为了解决这种多余的开销, 同时提高算法精度, 提出一种加入偏置项的正则化非负矩阵分解算法。

在非负矩阵分解的基础上加入偏置和正则化之后的非负矩阵分解的目标函数可以写成以下形式。

$$l = \min \frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{u,i \in R} (r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - p_{u \cdot} \cdot q_{\cdot i})^2 + \lambda_p \|\mathbf{P}\|_F^2 + \lambda_q \|\mathbf{Q}\|_F^2 \right) \quad (10)$$

其中, $\hat{r}_{u,i}$ 表示用户 u 对物品 i 的预测评分, 且 $\hat{r}_{u,i} = \mu + b_u + b_i + p_{u \cdot} \cdot q_{\cdot i}$, $r_{u,i}$ 表示用户 u 对物品 i 的真实评分, $\mathbf{P}$ 表示用户特征矩阵, $p_{u \cdot}$ 表示用户 u 的特征向量, $\mathbf{Q}$ 表示物品特征矩阵, $q_{\cdot i}$ 表示物品 i 的特征向量; μ 为全局偏置, b_u 为用户 μ 的偏置, b_i 为物品 i 的偏置。

求目标函数最优值的优化方法与非负矩阵分解算法相同, 也是随机梯度下降算法, 因此也先对目标函数关于用户特征矩阵与物品特征矩阵求偏导数。

$$\frac{dl}{dp_{uk}} = - \sum_{i \in I_u} q_{ki} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \lambda_p \cdot p_{uk} \quad (11)$$

$$\frac{dl}{dq_{ki}} = - \sum_{u \in U_i} p_{uk} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \lambda_q \cdot q_{ki} \quad (12)$$

将求得的偏导数式 (11) 和式 (12) 代入梯度下降的表达式中, 得到式 (13)。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} - \eta_p \left(- \sum_{i \in I_u} q_{ki} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \lambda_p \cdot p_{uk} \right) \\ q_{ki} = q_{ki} - \eta_q \left(- \sum_{u \in U_i} p_{uk} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \lambda_q \cdot q_{ki} \right) \end{cases} \quad (13)$$

即

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} + \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) - \eta_p \lambda_p \cdot p_{uk} \\ q_{ki} = q_{ki} + \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) - \eta_q \lambda_q \cdot q_{ki} \end{cases} \quad (14)$$

其中, η_p 和 η_q 是学习率。

式 (14) 可以拆写为以下形式。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} + \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot r_{u,i} - \\ \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \left(\mu + b_u + b_i + \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) - \eta_p \cdot \lambda_p \cdot p_{uk} \\ q_{ki} = q_{ki} + \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot r_{u,i} - \\ \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \left(\mu + b_u + b_i + \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) - \eta_q \cdot \lambda_q \cdot q_{ki} \end{cases} \quad (15)$$

与非负矩阵相同, 为了得到乘法迭代公式, 需要将学习率用式子来代替, 令

$$\begin{cases} p_{uk} = \eta_p \sum_{i \in I_u} q_{ki} \left(\mu + b_u + b_i + \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \eta_p \cdot \lambda_p \cdot p_{uk} \\ q_{ki} = \eta_q \sum_{u \in U_i} p_{uk} \left(\mu + b_u + b_i + \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) + \eta_q \cdot \lambda_q \cdot q_{ki} \end{cases},$$

得到以下学习率表达式。

$$\begin{cases} \eta_p = \frac{p_{uk}}{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot \hat{r}_{u,i} + \lambda_p \cdot p_{uk}} \\ \eta_q = \frac{q_{ki}}{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot \hat{r}_{u,i} + \lambda_q \cdot q_{ki}} \end{cases} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (15) 即得到最终的迭代表达式。

$$\begin{cases} p_{uk} = p_{uk} \frac{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot r_{u,i}}{\sum_{i \in I_u} q_{ki} \cdot \hat{r}_{u,i} + \lambda_p \cdot p_{uk}} \\ q_{ki} = q_{ki} \frac{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot r_{u,i}}{\sum_{u \in U_i} p_{uk} \cdot \hat{r}_{u,i} + \lambda_q \cdot q_{ki}} \end{cases} \quad (17)$$

用户偏置信息和物品偏置信息的更新也使用梯度下降的方式, 先求出目标函数关于用户偏置信息与物品偏置信息的偏导数。

$$\begin{aligned} \frac{dl}{db_u} &= -\sum_{i \in I_u} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) \\ \frac{dl}{db_i} &= -\sum_{u \in U_i} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

利用梯度下降的方式求最优解, 得到用户偏置和物品偏置的迭代表达式。

$$\begin{aligned} b_u &= b_u + \eta_b \sum_{i \in I_u} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) \\ b_i &= b_i + \eta_b \sum_{u \in U_i} \left(r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - \sum_{k=1}^K p_{uk} \cdot q_{ki} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

于是, 式 (17) 和式 (19) 为最终的迭代表达式。

通过上述迭代过程, 可以对用户评分矩阵 $\mathbf{R}$ 中的缺失项进行有效恢复。对 $\mathbf{R}$ 中每个用户的评分进行排序, 即可根据用户的行为数据获得用户对每个物品的喜好程度, 从而主动向用户推荐他们喜欢的商品。

3 实验分析

本文使用的数据集为京东开源用户行为数据, 对数据集进行预处理后, 样本数量为 332 600 对用户商品。在真实条件下, 无法直接获得用户对大量物品的评分, 但是可以通过用户行为间接分析用户评分, 从而获得用户-物品矩阵。京东开源用户行为数据集包含用户真实的点击、购买、收藏、浏览等信息, 根据这些用户行为信息, 可以利用本文提出的用户偏好程度模型构建方法计算用户-物品矩阵。

本实验使用 Spark 分布式平台进行分析。预处理后的数据存储分布在分布式文件系统 (HDFS) 中, 运行过程中 Spark 会将任务分片, 也会对数据集进行分布式存储, 然后进行处理。本实验中数据集的训练集与测试集按照 9:1 划分, 同时采用十折交叉验证的方式进行实验。

本文使用均方根误差 (RMSE) 作为评价指标。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (20)$$

其中, m 为 $\mathbf{R}$ 中的评分数量, y_i 为用户的真实评分, $\hat{y}_i$ 为用户的预测评分。

图 1 为正则化参数 λ 的变化对 RMSE 的影响, 从图中可以发现随着 λ 的增加, RMSE 逐渐减少,

但是当达到一定阈值时,随着 λ 的增加RMSE会逐渐增加,当 $\lambda=0.06$ 时推荐准确率最高,所以本次实验取 $\lambda=0.06$ 进行对比实验。

FunkSVD^[8]是在传统奇异值分解(SVD)面临计算效率问题时提出来的,传统SVD需要将用户-物品矩阵分解成3个矩阵,不仅很耗时,而且还面临数据稀疏的问题,因此FunkSVD仅将用户-物品矩阵分解成两个矩阵,即用户特征矩阵与物品特征矩阵,这在解决稀疏问题的同时也大幅降低了计算复杂度,并且FunkSVD在推荐领域应用广泛。因此将本文所提算法与广泛应用的FunkSVD进行对比,验证了本文所提算法的RMSE大大低于FunkSVD算法的RMSE。

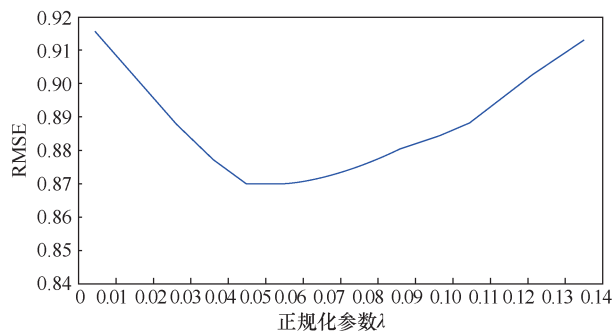


图1 正则化参数 λ 的调节

在FunkSVD迭代过程中容易出现过拟合现象,因此在目标函数中增加正则化项来防止过拟合,由于正则化项的加入会增大计算复杂度,因此实验结果表明RSNMF(regularized single-element based NMF)算法^[9]的RMSE低于FunkSVD算法,但所用时间高于FunkSVD算法,本文所提算法的RMSE低于RSNMF算法的RMSE,但是运行时间并没有比RSNMF算法高很多,这充分表明了本文所提算法的有效性。

从图2可以看出FunkSVD算法的RMSE较高,RSMF算法^[10]与bias_MF算法由于增加了正则化项与偏置,其RMSE更低一些。NMF算法由于使用了乘法迭代方式,保证了迭代过程中评分的非负性,所以比FunkSVD算法的误差更低一些。RSNMF算法比FunkSVD算法的RMSE低2.9%。本文所提bias_RSNMF算法比不加偏置的RSNMF算法的RMSE低1.7%。不加偏置的RSNMF算法捕捉的是用户和物品之间的交互,即大部分评分值只和用户、物品相关,而忽视了用户和物品之间的交互。加入了偏置的RSNMF算法考虑了用户和物品之间的交互,

使得准确率上升。RSNMF算法中集成了Tikhonov正则化,Tikhonov正则化是机器学习任务中广泛采用的一种策略,在矩阵分解中,可以提高预测精度。而FunkSVD算法没有加入正则项,所以RSNMF算法的准确度优于FunkSVD算法。从图2可以看出本文所提的bias_RSNMF算法的RMSE明显低于常用矩阵分解算法,证明了本文所提算法的误差较低。

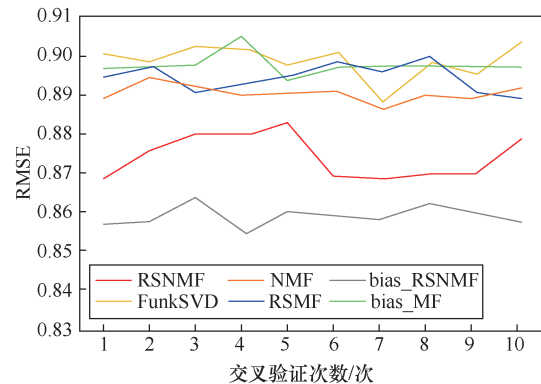


图2 不同算法的RMSE对比

从图3可以发现FunkSVD算法的运行速度最快,这也保证了该算法在大数据量的推荐领域的广泛应用。RSMF算法与bias_MF算法由于增加了正则化项与偏置项,迭代时间略有增加。bias_RSNMF算法比RSNMF算法的单次迭代时间增加2%,FunkSVD、RSNMF都是基于单个元素的矩阵分解,但是RSNMF需要再次遍历所有用户和所有物品,导致其循环次数多于FunkSVD算法,所以FunkSVD算法的单次训练迭代时间是最短的,bias_RSNMF算法在RSNMF算法的基础上加入了偏置导致时间有所上升,但是上升的幅度不是很大,准确度却有明显提升,这表明本文所提算法可以大幅提高准确度,且运行时间不会增加太多。

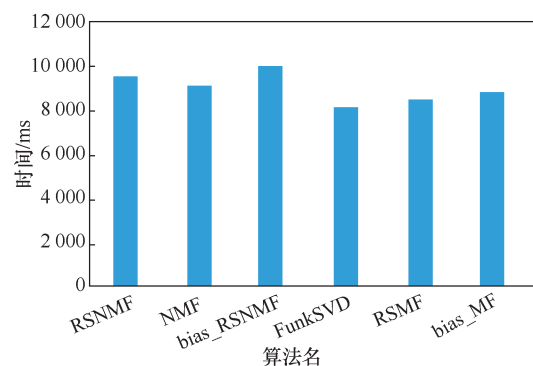


图3 6种算法单次训练迭代时间比较

4 结束语

针对购物网站上用户评分矩阵较难获得这一问题, 本文提出了一种用户偏好程度模型构建方法, 该方法通过分析用户的点击、购买、浏览、收藏等行为, 计算用户对物品的偏好程度, 构建用户评分矩阵, 有效解决了评分矩阵难以获得的问题。针对用户评分矩阵中存在大量空缺值, 难以在用户无法准确描述自己真正的需求及偏好时进行有效推荐的问题, 本文提出了一种加入偏置的正则化非负矩阵分解的算法, 通过在原始正则化非负矩阵分解的基础上加入偏置项, 有效利用了用户和物品之间的交互信息, 使得 RMSE 明显下降。

参考文献:

- [1] ADOMAVICIUS G, KWON Y. Improving aggregate recommendation diversity using ranking-based techniques[J]. IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering, 2012, 24(5): 896-911.
- [2] LEE D D, SEUNG S H. Learning the parts of objects by non-negative matrix-factorization[J]. Nature, 1999, 401: 788-791.
- [3] LEE D D, SEUNG S H. Algorithms for non-negative matrix-factorization[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2000, 13: 556-562.
- [4] ZHANG S, WANG W H, FORD J, et al. Learning from incomplete ratings using non-negative matrix-factorization[C]//2006 SIAM International Conference on Data Mining, April 20-22, 2006, Bethesda, MD, USA. [S.l.: s.n.], 2006: 549-553.
- [5] KOREN Y, BELL R. Recommender systems handbook[M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- [6] KOREN Y, BELL R, VOLINSKY C. Matrix-factorization techniques for recommender systems[J]. Computer, 2009, 42(8): 30-37.
- [7] YU K, ZHU S, LAFFERTY J, et al. Fast nonparametric matrix factorization for large-scale collaborative-filtering[C]// The 32nd ACM SIGIR Conference, July 19-23, 2009, Boston, MA, USA. New York: ACM Press, 2009: 211-218.
- [8] PATEREK A. Improving regularized singular value decomposition for collaborative filtering[C]// KDD Cup and Workshop 2007, Aug 12, 2007, San Jose, USA. New York: ACM Press, 2007: 39-42.
- [9] LUO X, ZHOU M, XIA Y, et al. An efficient non-negative matrix-factorization-based approach to collaborative filtering for recommender systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1273-1284.
- [10] GORRELL G. Generalized Hebbian algorithm for incremental singular value decomposition in natural language processing[C]// The 11st

Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, April 3-7, 2006, Trento, Italy. [S.l.: s.n.], 2006.

[作者简介]



贾俊 (1976-), 男, 青岛海尔 (胶州) 空调器有限公司高级技术经理, 主要研究方向为物联网、云计算、大数据算法。



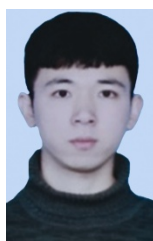
张斌 (1984-), 男, 青岛海尔 (胶州) 空调器有限公司高级精益咨询顾问, 主要研究方向为生产管理流程优化。



李志远 (1994-), 男, 青岛海尔 (胶州) 空调器有限公司大数据技术经理, 主要研究方向为人工智能算法应用研究。



魏玮 (1978-), 男, 青岛海尔 (胶州) 空调器有限公司生产技术总监, 主要研究方向为智能制造新技术应用。



魏浩 (1997-), 男, 山东科技大学计算机科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为大数据算法研究。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Vol.1 No.4 December 2019

Contents

Regular Papers

- Variation and learning: fuzzy system and fuzzy inference..... *GARIBALDI Jonathan M, CHEN Hongyu, LI Xiaoshuang* (319)
- Development prospect of fuzzy system oriented to interpretable artificial intelligence and big data
.....*CHEN Dewang, CAI Jijie, HUANG Yunhu* (327)
- Parallel art: artistic creation under human-machine collaboration.....
.....*GUO Chao, LU Yue, LIN Yilun, ZHUO Fan, WANG Fei-Yue* (335)
- Application and practice of machine learning model in real-time anti-fraud in the era of digital finance.....
.....*CAO Hanping, ZHANG Xiaojing, ZHU Ruijie, HUANG Xiaola* (342)
- Digital monitoring and modeling of activities: the IVFC case study.....*SUN Xingkai, WANG Xiao, LU Hao* (352)
- Brain network evolution modeling based on Alzheimer's disease.....*NI Bingjie, LI Wei, CHEN Xi* (369)
- The architecture and scheme of the hybrid-augmented intelligence open innovation platform based on the virtual and real systems
.....*ZHANG Jun, LI Lingxi, LIN Yilun, ZHANG Tianyun, ZHANG Ke, XU Peidong, RUAN Keyu, SHEN Dan* (379)
- Transportation scene recognition based on high level feature representation
.....*LIU Wenhua, LI Yidong, WANG Tao, WU Jun, JIN Yi* (392)
- Transparent farm based on blockchain technology.....
.....*WANG Xiujuan, HUA Jing, KANG Mengzhen, WANG Haoyu, YUAN Yong, WANG Fei-Yue* (400)
- Quantum blockchain: can blockchain integrated with quantum information technology resist quantum supremacy?
.....*ZHANG Jun, YUAN Yong, WANG Xiao, WANG Fei-Yue* (409)
- Federated visualization: a new model for privacy-preserving visualization
.....*WEI Yating, WANG Zhiyong, ZHOU Shuyue, CHEN Wei* (415)
- Personalized recommendation algorithm based on user behavior analysis.....
.....*JIA Jun, ZHANG Bin, LI Zhiyuan, WEI Wei, WEI Hao* (421)

智能科学与技术学报

2019年(第1卷)总目次

综 述

	期	页码
人工智能新时代·····	郑南宁	1 (1)
人工智能进入后深度学习时代·····	张 钹	1 (4)
平行轨道交通系统·····	宁 滨	3 (215)
基于统计前向规划算法的游戏通用人工智能·····	SIMON Lucas, 沈甜雨, 王 晓, 张 杰	3 (219)

学术论文

社会能源:从社会中获取能源·····	张 俊, 王飞跃, 方 舟	1 (7)
平行交通:虚实互动的智能交通管理与控制·····	吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 李镇江, 叶佩军, 朱凤华	1 (21)
平行装卸:迈向智慧物流的智能技术·····	沈大勇, 王 晓, 刘 胜	1 (34)
基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用·····	刘 腾, 王 晓, 邢 阳, 高 玉, 田 滨, 陈 龙	1 (40)
空间智能软体机械臂动力学建模与控制·····	张 翔, 刘红卫, 刘卓群, 闫振国, 陈小前, 黄奕勇	1 (52)
基于视觉伺服技术的工业机器人高动态物体跟踪系统·····	毛翊超, 陆 麒	1 (62)
基于半监督生成对抗网络的三维重建云工作室·····	余 翀	1 (70)
基于 UWB 定位技术的多移动机器人编队控制·····	郑亚君, 薛 磊, 董 璐, 王庆领	1 (83)
结合深度学习与生物特征识别在冷链拣选中的算法研究·····	陈妮亚, 阮佳阳, 黄金苗, 杨 伟	1 (88)
基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场机制设计·····	陈思远, 白昱阳, 张 俊, 王飞跃	1 (96)
平行农业:迈向智慧农业的智能技术·····	康孟珍, 王秀娟, 华 净, 王浩宇, 王飞跃	2 (107)
平行海上油气田:基于 ACP 的前期开发方案的设计与评估·····	魏 立, 王 红, 黄 敏, 魏 群, 缪青海	2 (118)
冷链云服务系统研究与应用·····	陈世超, 田 滨, 吕宜生, 胡 斌, 韩双双	2 (125)
基于积分反步法的四旋翼飞行器控制设计·····	郭 妍, 吴美平, 唐康华, 王雪莹	2 (133)
四轴飞行器—倒立摆系统的控制算法研究·····	孔凡国, 李肇星, 张健存, 熊 刚, NYBERG Timo R	2 (140)
用于轻度认知障碍诊断的群体相似约束功能脑网络建模方法·····	李伟凯, 高 欣, 纪同俭, 王政霞	2 (145)
基于自然免疫原理与可信计算的自主可控信息系统研究·····	柳 伟, 慈林林, 刘利平	2 (154)
基于人工智能技术的火电厂燃煤锅炉智能燃烧优化研究及应用·····	牛培峰, 马云鹏, 张欣欣, 胡晓宾	2 (163)
基于数据驱动的遗传算法的无人艇路径规划研究·····	辛峻峰, 张永波, 伯佳更, 赵博文, 范世缘	2 (171)
平行机器:一种智能机器的管理与控制框架·····	白天翔, 沈 震, 刘雅婷, 董西松	2 (181)
平行核电:迈向智慧核电的智能技术·····	侯家琛, 董西松, 熊 刚, 张 俊, 谭 珂	2 (192)
去中心化自治组织:发展现状、分析框架与未来趋势·····	丁文文, 王 帅, 李娟娟, 袁 勇, 欧阳丽炜, 王飞跃	2 (202)
端对端平行无人矿山系统及其关键技术·····	杨 超, 高 玉, 艾云峰, 田 滨, 陈 龙, 王 健, 王飞跃	3 (228)
基于数字孪生的智能电厂体系架构及系统部署研究·····	范海东	3 (241)
基于 MQTT 的工业物联网通信系统研究与实现·····	贾 凡, 熊 刚, 朱凤华, 田 滨, 韩双双, 陈世超	3 (249)
基于深度学习的髌关节应力分布算法研究·····	刘远平, 宋昱锴, 张小燕, 刘贤强	3 (260)
基于 ACP 的平行发电控制系统·····	侯国莲, 弓林娟, 苏 烨, 唐耀华	3 (269)
人在回路的混合增强智能在 Sawyer 的研究与验证·····	付海军, 陈世超, 林懿伦, 熊 刚, 胡 斌	3 (280)
面向在线餐饮外卖垃圾治理的智能可持续生态系统工程模型研究·····	张远馨, 周 明, 王深艳, 梁珍珍, 丁文文, 王 晓	3 (287)
智能针灸机器人关键技术及发展趋势·····	徐天成, 王雪军, 卢东东, 卢梦叶, 林 祺, 张小强, 成 艺	3 (305)
虚实互动的平行城市:基本框架、方法与应用·····	吕宜生, 王飞跃, 张 宇, 张晓东	3 (311)
差异与学习:模糊系统与模糊推理·····	GARIBALDI Jonathan M, 陈虹宇, 李小双	4 (319)
面向可解释性人工智能与大数据的模糊系统发展展望·····	陈德旺, 蔡际杰, 黄允沛	4 (327)
平行艺术:人机协作的艺术创作·····	郭 超, 鲁 越, 林懿伦, 卓 凡, 王飞跃	4 (335)
数字金融时代 机器学习模型在实时反欺诈中的应用与实践·····	曹汉平, 张晓晶, 祝睿杰, 黄潇拉	4 (342)
面向活动的网络媒体监测与建模分析:IVFC 案例解析·····	孙星恺, 王 晓, 陆 浩	4 (352)
阿尔兹海默症脑网络演化建模·····	倪冰洁, 李 炜, 陈 曦	4 (369)
虚实系统互驱的混合增强智能开放创新平台的架构与方案·····	张 俊, 李灵犀, 林懿伦, 张天韵, 张 科, 许沛东, 阮克羽, 沈 聘	4 (379)
基于高维特征表示的交通场景识别·····	刘文华, 李涪东, 王 涛, 郭 俊, 金 一	4 (392)
基于区块链技术的透明农场·····	王秀娟, 华 净, 康孟珍, 王浩宇, 袁 勇, 王飞跃	4 (400)
量子区块链:融合量子信息技术的区块链能否抵御量子霸权?·····	张 俊, 袁 勇, 王 晓, 王飞跃	4 (409)
联邦可视化:一种隐私保护的可视化新模型·····	魏雅婷, 王智勇, 周舒悦, 陈 为	4 (415)
基于用户行为分析的个性化推荐算法·····	贾 俊, 张 斌, 李志远, 魏 玮, 魏 浩	4 (421)

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Contents List Vol.1 (2019)

Comprehensive Reviews

	No.	Pages
The new era of artificial intelligence..... ZHENG Nanning	1	(1)
Artificial intelligence is entering the post deep-learning era ZHANG Bo	1	(4)
Parallel rail transportation system NING Bin	3	(215)
General game AI with statistical forward planning algorithms LUCAS Simon, SHEN Tianyu, WANG Xiao, ZHANG Jie	3	(219)

Papers

Social energy: mining energy from the society..... ZHANG Jun, WANG Fei-Yue, FANG Zhou	1	(7)
Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control..... LV Yisheng, CHEN Yuanyuan, JIN Junchen, LI Zhenjiang, YE Peijun, ZHU Fenghua	1	(21)
Parallel loading and unloading: smart technology toward intelligent logistics SHEN Dayong, WANG Xiao, LIU Sheng	1	(34)
Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving..... LIU Teng, WANG Xiao, XING Yang, GAO Yu, TIAN Bin, CHEN Long	1	(40)
Dynamical modeling and intelligent control of space soft manipulator ZHANG Xiang, LIU Hongwei, LIU Zhuoqun, YAN Zhenguo, CHEN Xiaoqian, HUANG Yiyong	1	(52)
A dynamic object tracking system of industrial robots based on visual servoing technology..... MAO Yichao, LU Qi	1	(62)
Three-dimensional reconstruction cloud studio based on semi-supervised generative adversarial networks..... YU Chong	1	(70)
Formation control of mobile robots with UWB localization technology..... ZHENG Yajun, XUE Lei, DONG Lu, WANG Qingling	1	(83)
Algorithm design for food-picking combining deep learning and biometrics recognition..... CHEN Niya, RUAN Jiayang, HUANG Jinmiao, YANG Wei	1	(88)
Design of transnational and intercontinental electricity market with blockchain and token economics CHEN Siyuan, BAI Yuyang, ZHANG Jun, WANG Fei-Yue	1	(96)
Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture KANG Mengzhen, WANG Xiujuan, HUA Jing, WANG Haoyu, WANG Fei-Yue	2	(107)
Parallel offshore oil/gas field: ACP-based front end engineering design and evaluation WEI Li, WANG Hong, HUANG Min, WEI Qun, MIAO Qinghai	2	(118)
Research and application of cloud service system for cold chain CHEN Shichao, TIAN Bin, LV Yisheng, HU Bin, HAN Shuangshuang	2	(125)
Integral back-stepping algorithm for designing the quadrotor aircraft controller..... GUO Yan, WU Meiping, TANG Kanghua, WANG Xueying	2	(133)
Research on control algorithm of a four axis air vehicle-inverted pendulum system KONG Fanguo, LI Zhaoxing, ZHANG Jiancun, XIONG Gang, NYBERG Timo R	2	(140)
Method of functional brain network modeling with group similarity constraint for mild cognitive impairment classification LI Weikai, GAO Xin, JI Tongjian, WANG Zhengxia	2	(145)
Research of independent and controllable information system based on natural immune system and trusted computing LIU Wei, CI Linlin, LIU Liping	2	(154)
Research and application on combustion optimization of coal-fired boiler in thermal power plant based on artificial intelligence technology NIU Peifeng, MA Yunpeng, ZHANG Xinxin, HU Xiaobin	2	(163)

Study on path planning of unmanned surface vessel based on data-driven genetic algorithm		
..... XIN Junfeng, ZHANG Yongbo, BO Jiageng, ZHAO Bowen, FAN Shiyuan	2	(171)
Parallel machine: a framework for the control and management for intelligent machines		
..... BAI Tianxiang, SHEN Zhen, LIU Yating, DONG Xisong	2	(181)
Parallel nuclear power: intelligent technology for smart nuclear power		
..... HOU Jiachen, DONG Xisong, XIONG Gang, ZHANG Jun, TAN Ke	2	(192)
Decentralized autonomous organizations: the state of the art, analysis framework and future trends		
..... DING Wenwen, WANG Shuai, LI Juanjuan, YUAN Yong, OUYANG Liwei, WANG Fei-Yue	2	(202)
End-to-end parallel autonomous mining systems and key technologies		
..... YANG Chao, GAO Yu, AI Yunfeng, TIAN Bin, CHEN Long, WANG Jian, WANG Fei-Yue	3	(228)
Research on architecture and system deployment of intelligent power plant based on digital twin		
..... FAN Haidong	3	(241)
Research and implementation of industrial Internet of things communication system based on MQTT		
..... JIA Fan, XIONG Gang, ZHU Fenghua, TIAN Bin, HAN Shuangshuang, CHEN Shichao	3	(249)
Research on hip joint stress distribution algorithms based on deep learning		
..... LIU Yuanping, SONG Yukai, ZHANG Xiaoyan, LIU Xianqiang	3	(260)
ACP based parallel power generation control system		
..... HOU Guolian, GONG Linjuan, SU Ye, TANG Yaohua	3	(269)
Research and validation of human-in-the-loop hybrid-augmented intelligence in Sawyer		
..... FU Haijun, CHEN Shichao, LIN Yilun, XIONG Gang, HU Bin	3	(280)
Research on sustainable intelligent model for online catering take-out trashes		
..... ZHANG Yuanxin, ZHOU Ming, WANG Shenyan, LIANG Zhenzhen, DING Wenwen, WANG Xiao	3	(287)
Developing trend and key technical analysis of intelligent acupuncture robot		
..... XU Tiancheng, WANG Xuejun, LU Dongdong, LU Mengye, LIN Qi, ZHANG Xiaoqiang, CHENG Yi	3	(305)
Parallel cities: framework, methodology, and application		
..... LYU Yisheng, WANG Fei-Yue, ZHANG Yu, ZHANG Xiaodong	3	(311)
Variation and learning: fuzzy system and fuzzy inference		
..... GARIBALDI Jonathan M, CHEN Hongyu, LI Xiaoshuang	4	(319)
Development prospect of fuzzy system oriented to interpretable artificial intelligence and big data		
..... CHEN Dewang, CAI Jijie, HUANG Yunhu	4	(327)
Parallel art: artistic creation under human-machine collaboration		
..... GUO Chao, LU Yue, LIN Yilun, ZHUO Fan, WANG Fei-Yue	4	(335)
Application and practice of machine learning model in real-time anti-fraud in the era of digital finance		
..... CAO Hanping, ZHANG Xiaojing, ZHU Ruijie, HUANG Xiaola	4	(342)
Digital monitoring and modeling of activities: the IVFC case study		
..... SUN Xingkai, WANG Xiao, LU Hao	4	(352)
Brain network evolution modeling based on Alzheimer's disease		
..... NI Bingjie, LI Wei, CHEN Xi	4	(369)
The architecture and scheme of the hybrid-augmented intelligence open innovation platform based on the virtual and real systems		
..... ZHANG Jun, LI Lingxi, LIN Yilun, ZHANG Tianyun, ZHANG Ke, XU Peidong, RUAN Keyu, SHEN Dan	4	(379)
Transportation scene recognition based on high level feature representation		
..... LIU Wenhua, LI Yidong, WANG Tao, WU Jun, JIN Yi	4	(392)
Transparent farm based on blockchain technology		
..... WANG Xiujuan, HUA Jing, KANG Mengzhen, WANG Haoyu, YUAN Yong, WANG Fei-Yue	4	(400)
Quantum blockchain: can blockchain integrated with quantum information technology resist quantum supremacy?		
..... ZHANG Jun, YUAN Yong, WANG Xiao, WANG Fei-Yue	4	(409)
Federated visualization: a new model for privacy-preserving visualization		
..... WEI Yating, WANG Zhiyong, ZHOU Shuyue, CHEN Wei	4	(415)
Personalized recommendation algorithm based on user behavior analysis		
..... JIA Jun, ZHANG Bin, LI Zhiyuan, WEI Wei, WEI Hao	4	(421)

智能科学与技术学报
(Zhineng Kexue yu Jishu Xuebao)

CHINESE JOURNAL OF INTELLIGENT SCIENCE AND TECHNOLOGY

第1卷 第4期 2019年12月

Vol. 1 No. 4 Dec. 2019

名誉主编 郑南宁
主 编 王飞跃
主管单位 中华人民共和国工业和信息化部

Honorary Editor-in-Chief ZHENG Nanning
Editor-in-Chief WANG Fei-Yue
Administred by Ministry of Industry and Information Technology of the

主办单位 人民邮电出版社有限公司
学术指导 中国自动化学会
出版单位 北京信通传媒有限责任公司
印刷装订 北京时捷印刷有限公司

Sponsored by Posts & Telecom Press Co., Ltd.
Guidance Unit Chinese Association of Automation
Published by China InfoCom Media Group
Printed by Beijing Speed Printing Co., Ltd.

编辑单位 《智能科学与技术学报》编辑部

Edited by Editorial Office of Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

地址: 北京市丰台区成寿寺路11号邮电出版大厦8层

邮政编码: 100078

主任: 杨 凌

电话: (010)81055465 (010)81055358

传真: (010)81055464

www.cjst.com.cn

Add: PK, You Dian Publisher Building, No.11, Chengshousi Road,

Fengtai District, Beijing 100078, PR China

Director: YANG Ling

Tel: (010)81055465 (010)81055358

Fax: (010)81055464

www.cjst.com.cn

国内统一连续出版物号: CN 10-1604/TP

广告经营许可证号: 京东工商广登字20170149号

定价: 60.00元



ISSN 2096-6652



9 772096 665197