

# 逆向学习耦合多属性查询的图像排序/检索优化算法研究

杨叶芬, 曾东海, 刘海, 段班祥

(广东科学技术职业学院, 珠海 519090)

**摘要:** **目的** 提出逆向学习耦合多属性查询的图像同步排序/检索优化算法,以解决当前算法检索效率与精度不高等问题。**方法** 引入逆向学习概念,利用复杂无损函数,设计图像检索机制,优化训练误差。考虑查询项属性相关性,将训练图像分割成多个子集,联合权重因子,构造图像排序模型。对于给定的多属性查询,文中算法可以利用查询项中隐含的单词属性完成检索。**结果** 文中算法支持多标记查询,与当前图像排序搜索机制相比,在多属性查询条件下,文中算法具有更高的检索精度(当查全率为80%时,精度较对照组分别提高了8.3%和13.2%)与效率。**结论** 文中算法能够支持多属性查询,能进一步增加检索精度。

**关键词:** 多属性查询; 图像排序-检索; 逆向学习; 属性相关性; 检索精度

**中图分类号:** TS801.8    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0084-07

## Image Synchronization Sorting-retrieval Optimization Algorithm Based on Reverse Learning and Multi-attribute Queries

YANG Ye-fen, ZENG Dong-hai, LIU Hai, DUAN Ban-xiang

(Guangdong Institute of Science and Technology, Zhuhai 519090, China)

**ABSTRACT:** Image synchronization sorting-retrieval optimization algorithm was proposed to solve the problems of low retrieval efficiency and accuracy of the existing algorithm. The image retrieval model was designed by introducing the concept of reverse learning. The complex lossless function was used to design the image retrieval mechanism and optimize the training error. Taking into account the attribute relevance of the query terms, we divided the training images into multiple subsets, and constructed the image ranking model by coupling the weighted factors to improve the effectiveness of attribute based image search. For given multi-attribute queries, the algorithm proposed in this paper could complete the retrieval using the word attribute contained in the queries. This algorithm supported multi-label queries, and had higher retrieval accuracy (when the recall rate was 80%, the accuracy was increased by 8.3% and 13.2% respectively as compared to the control group) and efficiency for multi-attribute queries as compared to the existing image sorting-retrieval mechanisms. In conclusion, the algorithm proposed could support multi-attribute queries and further increase the retrieval accuracy.

**KEY WORDS:** multi-attribute queries; image sorting-retrieval; reverse learning; attribute relevance; retrieval accuracy

随着互联网与计算机交叉科学技术的快速发展与完善,信息多样化程度逐步提高,如图像、音频等多媒体信息日益丰富,尤其是图像信息,其容量巨大<sup>[1-4]</sup>。如何高效、精确、快速地从图像库中挖掘到目

标图像,已成为该领域的研究热点。相关研究表明,对图像排序能够显著提高检索效率。对此,学者们提出了相应的图像排序/检索技术。该技术是基于用户设定好的目标图像特征,通过图像排序,与搜索目标

收稿日期: 2014-09-18

基金项目: 广东省自然科学基金(S2013010012920); 广东省高职教育信息技术类专业教学指导委员会项目(XXJS-2013-2004); 广东科学技术职业学院教学改革项目(JG201318)

作者简介: 杨叶芬(1981—),女,广东顺德人,硕士,广东科学技术职业学院讲师,主要研究方向为图形图像处理、嵌入式系统应用。

接近的图像优先被检索,继而显著增加检索效率。Xiaojun Qi等人<sup>[5]</sup>为了提高算法检索性能,设计了一种可扩展的基于图论的半监督图像排序机制,并将其用于图像检索,通过利用基于直推短期学习的相关反馈与基于语义特征的长期学习算法的耦合系统,设计了半监督图像排序-检索算法,并验证其算法的合理性,结果表明该检索技术具有良好的检索效果与效率。Hong Gu等人<sup>[6]</sup>设计了排序函数集合,并引入相关反馈系统,设计了基于网上度量学习的相关反馈机制,并将其用于多特征图像排序/检索算法,最后借助仿真技术,测试其算法性能,结果显示该算法具有良好的检索精度。Yang Yi等人<sup>[7]</sup>为了提高检索精度,设计了半监督图像排序机制,该机制提供局部线性回归模型,预测每个数据点的相邻点的排名分数,并以此提出全局对齐模型,获得最佳排名分数,继而完成数据信息检索,并验证其技术的有效性,结果表明,该算法具有更好的检索性能。田靛等人<sup>[8]</sup>设计了基于颜色内容的图像检索系统,并对其检索机制进行了优化,利用MTM替代传统的HSV空间,实验结果显示该系统具有良好的检索性能。

尽管上述图像排序/检索机制可以获得较好的检索性能,但是这种技术通过训练每个单词对应的独立分类器以及联合输出结果来完成图像检索,使排序与检索成为2个独立的过程,无法同步进行。这些算法中的排序机制都忽略了查询项之间的相关性,只是简单地将训练图像分为相关与不相关集,无法支持多标签查询,降低了检索精度。为此,文中设计逆向学习耦合多属性查询的图像同步排序与综合搜索优化算法。引入逆向学习概念,设计图像检索机制。考虑查询项属性相关性,并基于相关性,将训练图像分割成多个子集,联合权重因子,赋予每个属性相应的权重因子,构造图像排序模型,以辅助增加图像检索效率。最后在仿真平台上测试文中排序/检索算法性能。

## 1 多属性图像排序/检索算法设计

### 1.1 图像检索

给定标记集合 $X$ 与训练图像 $Y$ 。对于 $X$ 中的元素 $x_i, x_i \in X$ ,都有映射来预测训练图像 $y_i, y_i \in Y$ 。由于逆向学习具有结构输出(图像集)和良好的结构预测能力,可以较好地处理多标签分类。故文中引入逆向学习概念<sup>[9]</sup>,构建图像检索模型。

给定一个多属性查询 $Q, Q \in X$ ,其目标是在训练图像集合 $Y$ 中检索出与 $Q$ 相关的图像。从训练图像集 $Y$ 中,基于逆向学习((详细的学习机制见文献[9]的算法1),对于一个输入 $Q$ ,其输出结果为包含 $Q$ 中所有组成属性的图像 $y^*$ 集合。因此,预测函数 $f_w: Q \rightarrow y$ 返回集合 $y^*$ 中,从而最大化权重矢量 $w$ 的得分:

$$y^* = \arg \max_{y_i \in Y} w^T \varphi(Q, y) \quad (1)$$

$$w^T \varphi(Q, y) = \sum_{x_i \in Q} w_i^a \varphi_a(x_i, y) + \sum_{x_j \in Q} \sum_{x_k \in X} w_{ij}^p \varphi_p(x_j, y) \quad (2)$$

$$\varphi_a(x_i, y) = \sum_{y_k \in Y} \Phi_a(x_i, y_k) \quad (3)$$

$$\varphi_p(x_j, y) = \sum_{y_k \in Y} \Phi_p(x_j, y_k) \quad (4)$$

式中: $w$ 为权重矢量,包含 $w^a$ 表征每个属性的出现, $w^p$ 代表这些属性的相关性; $w^T$ 为 $w$ 的转置矢量; $Q$ 为给定的属性查询; $y$ 为训练图像; $Y$ 为训练图像集合; $\varphi$ 为特征函数; $\Phi_a(x_i, y_k)$ 为属性 $x_i$ 对应的图像 $y_k$ 的特征矢量; $\Phi_p(x_j, y_k)$ 代表潜变量,表示存在图像 $y_k$ 的属性 $x_j$ ; $a, p$ 分别为图像的排序号。

在模型(2)中, $w_i^a$ 是一个线性模型,根据特征矢量 $\Phi_a(x_i, y_k)$ 来识别属性 $x_i$ , $w_{ij}^p$ 为潜函数,以编码属性 $x_i$ 与 $x_j$ 的相关性。利用模型(3)代替模型(2)中的第1项,代表着查询项 $Q$ 中所有属性 $x_i$ 的置信度得分总和。同理,利用模型(4)代替模型(2)中的第2项,表示查询属性 $x_i \in Q$ 与属性集合 $X$ 之间的关系,因此,确保其可挖掘查询属性 $Q$ 的隐含信息。

给定一组多标签训练图像 $Y$ 及其各自标签,文中目标是对于给定的多标签查询 $Q \in X$ ,训练模型 $w$ ,借助逆向学习,使其可以正确地预测出测试集 $Y_t$ (包含了所有标签 $x_i \in Q, t$ 代表图像序号)中图像 $y$ 的子集。

文中利用神经网络 $NN$ 来训练权重矢量 $w$ ,并行化、模块化及动态自适应是其3个典型的计算特性,其多层感知器<sup>[10]</sup>包括:输入层、隐蔽层和输出层,见图1。

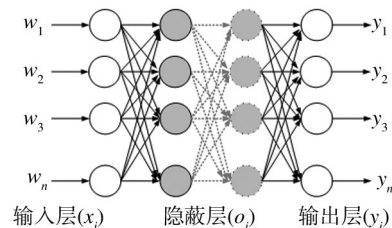


图1 多层前馈神经网络

Fig.1 Schematic diagram of multilayer feed forward neural network

图1中的3个层主要是利用与前反馈环节相联系

的神经元完成训练,见图2。其中, $\Sigma$ 为求和运算; $\int$ 为积分运算。

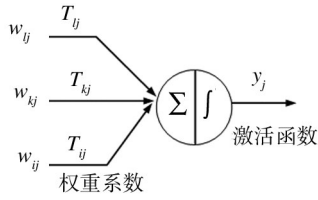


图2 一个神经网络单元信息处理过程

Fig.2 Schematic of a neural network information processing unit

首先输入总权重。对于输入层,其隐蔽层节点的输入值为:

$$\sum_i T_{ij} = \sum_i \frac{1}{1 + e^{-w_{ij}}} \quad (5)$$

再基于权重,输出实际值 $y_i$ 。

$$y_i = [(\sum_i T_{ij} \cdot w_{ij}) - b_j] \quad (6)$$

式中: $y_i$ 为神经元的输出值; $T_{ij}$ 为突触权重系数; $b_j$ 为阈值。

具体训练步骤如下所述。

1) 对神经网络原始参数进行初始化。初始化神经网络参数:学习初速度为0.1,允许误差为 $10^{-5}$ ,隐层节点个数为30,最大迭代次数为50 000。

2) 输入训练样本 $N$ ,根据公式(5),估算各层间的 $T_{ij}$ 。

3) 再由模型(6)估算样本的输出值 $y_i$ 。

4) 根据实际输出 $y_i$ 与期望值 $q_i$ ,计算其误差 $E$ ,判定 $E$ 是否达到设定要求。若满足,则执行步骤(7);若不满足,则执行步骤(5)。误差 $E$ 计算模型为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (q_i - y_i) \quad (7)$$

5) 计算 $n+1$ 是否超过训练所设定的迭代次数上限,若大于,则执行步骤(7);否则,逆向估算每个样本的相应的神经元的偏导数 $d(n)$ 。

6) 根据模型(8)和(9),更新学习速度 $\eta$ 与连接权重 $T$ ;当 $n=n+1$ 时,执行步骤(2)。 $\eta$ 与 $T$ 的计算模型为:

$$T(n+1) = T(\eta) + \eta(n)[(1-a)d(n) + ad(n-1)] \quad (8)$$

$$\eta(n+1) = \begin{cases} 1.05\eta(n) & \text{if } E(n+1) < E(n) \\ 0.7\eta(n) & \text{if } E(n+1) > 1.04E(n) \\ \eta(n) & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $a \in [0, 1]$ 为动量因子; $\eta(n)$ 为学习速度; $d(n)$ 为 $n$ 时刻的偏导数。

7) 判别是否训练完全部的训练样本 $N$ ,如是,则结束;否则,执行步骤(2)。

再令 $R$ 是查询项集合,其包含了单属性和多属性。在训练期间,通过学习 $w$ ,使得对于每个查询项 $Q$ ,检索图像 $y$ 的预期输出得分(模型1)要高于其他任何集合 $y \in Y$ 。由此,引入最大利润思想<sup>[11]</sup>,则其可表示为:

$$\arg \min_{w, \varepsilon} (w^T w + C \sum_i \varepsilon_i), \quad \forall t w^T \varphi(Q_i, y_i^*) - w^T \varphi(Q_i, y_i) \geq \Delta(y_i^*, y_i) - \varepsilon_i \quad (10)$$

式中: $C$ 为控制参数,以调节训练误差与正则化之间的权衡; $Q_i (Q_i \in R)$ 为训练查询项; $\varepsilon_i$ 为查询项 $Q_i$ 对应的松弛变量; $\Delta(y_i^*, y_i)$ 为复杂无损函数,以惩罚输出图像 $y_i$ ,使其与正确图像 $y_i^*$ 误差很小。

再基于不同的性能指标,优化训练误差:

$$\Delta(y_i^*, y_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i \cap y_i^*|}{|y_i|} & \text{precision 指标} \\ 1 - \frac{|y_i \cap y_i^*|}{|y_i^*|} & \text{recall 指标} \\ 1 - \frac{|y_i \cap y_i^*| + |\bar{y}_i \cap \bar{y}_i^*|}{|Y|} & \text{hamming loss 指标} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $y_i$ 为输出图像; $y_i^*$ 为正确图像; $\bar{y}_i$ 为预测图像;precision为精度指标;recall为查准率指标;hamming loss为汉明损失指标。

对于模型(10)中的二次优化问题,包含 $O(|R|2^{|Y|})$ 个约束。为解决此问题,文中引入约束生成策略<sup>[12]</sup>,通过不断地迭代,来求解模型(10)。初始,不设置任何限制。随后,在每轮迭代中,将当前解的最违反约束添加到约束集合中。最违反约束模型<sup>[12]</sup>为:

$$\varepsilon_i \geq \max[\Delta(y_i^*, y_i) - w^T \varphi(Q_i, y_i^*) - w^T \varphi(Q_i, y_i)] \quad (12)$$

给定多属性查询项“young Asian woman wearing sunglass”,利用文中检索模型与传统方法进行搜索,结果见图3。从图3可知,与传统检索方法相比,文中算法能够挖掘出查询项中的隐含信息:相关图像,不具有胡子、胡须、光头以及金发,应具备黑发,从而增加了检索精度,而传统检索机制的搜索效果不佳。

## 1.2 图像排序

在图像检索模型的基础上,进行微小修改,同样适用于排序多标签查询 $Q \in X$ 。给定多属性查询,根据 $Q$ 的相关性,对图像 $Y$ 集合进行排序,以增加检索效



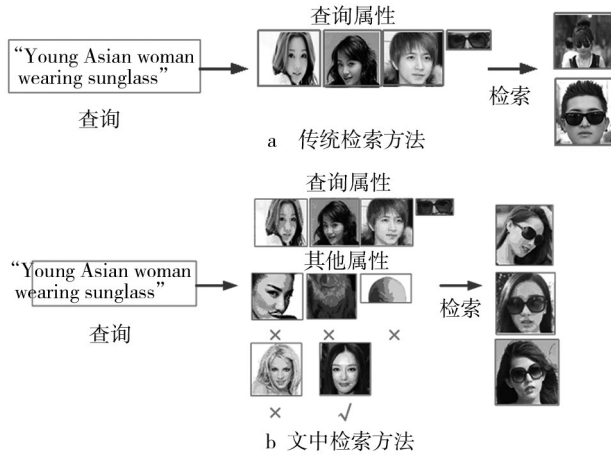


图3 不同检索方法的搜索结果

Fig.3 Retrieval results of different retrieval methods

率。图像排序的输入是测试图像集,预测函数为 $f_w$ :  
 $Q \rightarrow Z$ ,则排序输出为图像置乱 $Z^*$ :

$$Z^* = \arg \max_{Z \in \pi(Y)} w^T \varphi(Q, Z) \quad (13)$$

$$w^T \varphi(Q, Z) = \sum_{x_i \in Q} w_i^a \vec{\varphi}_a(x_i, Z) + \sum_{x_i \in Q} \sum_{x_j \in X} w_{ij}^p \vec{\varphi}_p(x_i, Z) \quad (14)$$

$$\vec{\varphi}_a(x_i, Z) = \sum_{Z_k \in Z} A(r(Z_k)) \rho(x_i, Z_k) \quad (15)$$

$$\vec{\varphi}_p(x_j, Z) = \sum_{Z_k \in Z} A(r(Z_k)) \rho_p(x_j, Z_k) \quad (16)$$

式中:  $\pi(Y)$ 为图像 $Y$ 集所有置乱可能性; $Z$ 为输入图像; $A(r)$ 为任何一个非递增函数; $r(Z_k)$ 为图像 $Z_k$ 的排序。

若只考虑前 $K$ 个图像的排序,则 $A(r)$ 定义为:

$$A(r) = \max(K+1-r, 0) \quad (17)$$

式中: $r$ 为图像排序。

该排序机制与其他方法不同,传统的排序机制只是简单地将训练图像分割为与查询属性相关集合与不相关集合,仅仅学习了一个二进制排序,而文中算法则利用相关性的多个级别。给定一个查询 $Q$ ,文中基于属性相关性,将训练图像分割为 $|Q|+1$ 个集合。最相关集合是由包含查询项 $Q$ 所有属性的图像构成,并赋予其相关性 $\text{Rel}(j)=|Q|$ ;最不相关集合是由不包含查询项 $Q$ 属性的图像构成,并赋予其相关性 $\text{Rel}(j)=0$ ,从而确保包含查询属性最多的图像排序靠前,有利于图像检索。

与图像检索类似,文中引入最大利润思想,但对于图像排序,使用了一个不同的无损函数来训练排序模型:

$$\arg \min_{w, \varepsilon} (w^T w + C \sum_i \varepsilon_i), \quad \forall i w^T \varphi(Q_i, Z_i^*) -$$

$$w^T \varphi(Q_i, Z_i) \geq \Delta(Z_i^*, Z_i) - \varepsilon_i \quad (18)$$

式中: $\Delta(Z_i^*, Z_i)$ 为预测置乱 $Z_i$ 代替正确置乱 $Z_i^*$ 时的无损函数。

定义 $\Delta(Z_i^*, Z_i)$ :

$$\Delta(Z_i^*, Z_i) = 1 - S@100(Z^*, Z) \quad (19)$$

$$S@V = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{2^{\text{rel}(j)} - 1}{\log(1+j)} \quad (20)$$

式中: $S@V$ 为一定数量图像的收益; $\text{Rel}(j)$ 为第 $j$ 个排序图像的相关性; $V$ 为排序图像数量,文中取 $V=100$ ;  $K$ 为归一化常量。

由于模型(19)同样含有约束,再次引入约束生成策略,将最违反约束引入到优化问题中。最违反约束模型为:

$$\varepsilon_i \geq \max_{Z_i \in \pi(y)} [\Delta(Z_i^*, Z_i) - w^T \varphi(Q_i, Z_i^*) - w^T \varphi(Q_i, Z_i)] \quad (21)$$

去除 $Z_i$ 后,代入公式(14),(15),(19),得到模型为:

$$\arg \max_{Z_i \in \pi(Y)} \sum_{K=1}^{100} A(Z_K) W(Z_K) - \sum_{K=1}^{100} \frac{2^{\text{rel}(Z_K)} - 1}{\log(1+K)} \quad (22)$$

其中为:

$$W(Z_K) = \sum_{x_i \in Q_i} w_i^a \varphi_a(x_i, Z_K) + \sum_{x_j \in Q_i} \sum_{x_j \in X} w_{ij}^p \varphi_p(x_j, Z_K) \quad (23)$$

模型(22)是 $Z_K$ 一个线性分配问题,通过Kuhn-Munkres算法<sup>[13]</sup>可有效求解模型(22)。在预测期间,需要求解模型(13),则其可以写成:

$$\arg \max_{z \in \pi(y)} \sum_K A(r(Z_K)) W(Z_K) \quad (24)$$

## 2 仿真结果及分析

文中借助图库a-PASCAL<sup>[14]</sup>以及a-TRECVID<sup>[15]</sup>进行测试。为了体现文中算法的优越性,采用当前相似性检索性能较好的算法作为对照组:文献[16]的多标记学习和文献[17]的Tagprop算法,分别记为A,B算法。

### 2.1 图像检索精度分析

将文中检索排序算法与对照组在a-PASCAL图库里完成目标搜索。该图库含有12 695幅标记图像(6340幅训练图像、6355幅测试图像)以及64种属性<sup>[14]</sup>。给定多属性查询项"Bird Feather on Glassland",不同算法的检索结果见图4。由图4可知,



文中检索/排序算法搜索到与目标图像相近的数量比 A,B 算法的多,而与目标差距较大的不相关的图像数目(红色框内)比 A,B 算法的少。由于文中算法考虑了查询项之间的相关性,支持多标记查询,且能挖掘出查询项中隐含的单词属性完成检索(如 not in sky,

small)。对照组不支持多属性查询,只是将简单训练图像分为相关与不相关集,根据直接属性进行检索,易出现“近似伪目标”,降低了算法的检索精度。

为了量化检索算法的精度,文中引用查全率-查准率<sup>[18]</sup>及<sup>[19]</sup>AUC(Area Under Curve)指标。查全率-查



a 文中算法的检索效果



b A算法的检索效果



c B算法的检索效果

图4 不同图像检索算法的检索结果  
Fig.4 Retrieval results of different image retrieval algorithms

准率模型为:

$$\text{查准率} = \frac{\text{相关图像检索的数量}}{\text{图像检索的总数量}} \quad (25)$$

$$\text{查全率} = \frac{\text{相关图像检索的数量}}{\text{图库中相关图像的总数量}} \quad (26)$$

从 a-PASCAL 图库中随机择取 2000 幅图像作为查询图,并测试 3 种检索/排序算法的查全率-查准率曲线,结果见图 5。由图 5 可知,当查全率为 0~30% 时,3 种算法的查准率相差无几;当查全率为 35%~80% 时,文中算法的优势最大;当查全率为 80% 时,就 A、B 算法而言,分别提高了 8.3%、13.2%。

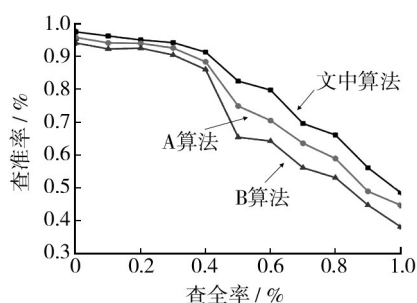


图5 不同图像检索机制的查全率-查准率曲线

Fig.5 Recall-Precise curves of different image retrieval mechanisms

不同检索算法在不同多属性查询条件下的检索性能见图 6。由图 6 可知,在不同多属性查询条件下,文中算法的 AUC 值始终是最高的。在三属性查询下,文中算法的 AUC 值高达 0.852,对照组的分别为 0.827、0.807,这与图 4—5 的检索结果相相应。

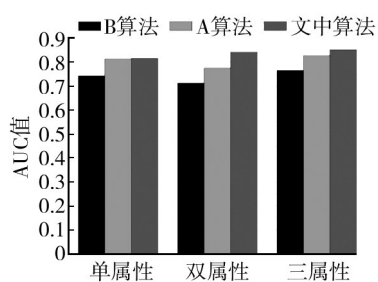


图6 不同属性查询下的检索性能

Fig.6 Retrieval performance of different multi-attribute queries

## 2.2 检索速度分析

在 a-TRECVID<sup>[20]</sup> 图库中测试各图像的检索速度,文中检索算法耗时 37 s, A 算法耗时 52 s, B 算法耗时 97 s, 所以文中检索算法的检索效率更高。主要原因是文中算法基于逆向学习,设计了检索模型,使其具有较好的结构预测能力,且文中设计了图像排序模

型,将与目标图像最相似的图片排列靠前,从而显著减少了随机检索的时间。

## 3 结语

引入逆向学习概念,利用复杂无损函数,设计了图像检索机制,优化了训练误差。考虑查询项属性的相关性,将训练图像分割成多个子集,联合权重因子,构造图像排序模型。提出了逆向学习耦合多属性查询的图像排序/搜索优化算法。对于给定的多属性查询,文中算法可以利用查询项中隐含的单词属性完成检索,显著提高了检索精度,有效地解决了当前图像检索机制存在的检索精度以及效率不高等问题。仿真结果表明文中算法支持多标记查询,且在多属性查询条件下,文中算法具有更高的检索效率和精度。

## 参考文献:

- [1] 许向阳,张旭亮,李博. 基于颜色属性相关性的图像色差公式的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 98—101.  
XU Xiang-yang, ZHANG Xu-liang, LI Bo. Image Color Difference Formula Based on Correlation of Color Attribute[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 98—101.
- [2] 田玉萍. 混沌神经元耦合置乱神经元的图像加密算法研究[J]. 包装工程, 2014, 35(15): 101—106.  
TIAN Yu-ping. Image Encryption Algorithm Based on Chaotic Neuron Coupled Permutation Neuron[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(15): 101—106.
- [3] 孙刘杰,王子煜. 一种新的安全鲁棒全息数字水印技术[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 106—110.  
SUN Liu-jie, WANG Zi-yu. A New Holographic Digital Watermarking Technology with Good Security and Robustness[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 106—110.
- [4] 纪钢,肖朝晖. 产品包装外观图像信息数字化及数据库技术的应用[J]. 包装工程, 2005, 26(4): 104—106.  
JI Gang, XIAO Chao-hui. The Application of Digitalization and Database Technology of Product Packaging External Appearance Picture Information[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4): 104—106.
- [5] QI Xiao-jun, CHANG Ran. A Scalable Graph-based Semi-supervised Ranking System for Content-based Image Retrieval[J]. International Journal of Multimedia Data Engineering and Management, 2013, 4(4): 15—34.
- [6] GU Hong, ZHAO Guang-zhou, QIU Jun. Online Metric Learning for Relevance Feedback in E-Commerce Image Retrieval Applications[J]. Tsinghua Science & Technology, 2011, 16(4): 377—385.

- [7] YANG Yi, NIE Fei-ping, XU Dong. A Multimedia Retrieval Framework Based on Semi-supervised Ranking and Relevance Feedback[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 12(5): 1256—1267.
- [8] 田靛. 基于颜色内容的图像检索方法的比较[J]. 包装工程, 2009, 30(4): 84—87.  
TIAN Liang. Comparison of Image Retrieval Methods Based on Color Content[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 84—87.
- [9] PETERSON J, CAETANO T S. Reverse Multi-label learning [J]. Advances in Neural Information, 2010, 23(11): 803—808.
- [10] FRINKEN V, FISCHER A, MANMATHA R. A Novel Word Spotting Method Based on Recurrent Neural Networks[J]. Pattern Analysis and Machine, 2012, 34(2): 211—224.
- [11] FAN Jian-ping, SHEN Yi, YANG Chun-lei. Structured Max-margin Learning for Inter-related Classifier Training and Multilabel Image Annotation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 20(3): 837—854.
- [12] CARLOS M, KRISHNANAND N K, SATYANDRA K G. Improving Assembly Precedence Constraint Generation by Utilizing Motion Planning and Part Interaction Clusters[J]. Computer-aided Design, 2013, 45(11): 1349—1364.
- [13] ZHU Hai-bin, ZHOU Meng-chu. Efficient Role Transfer Based on Kuhn-Munkres Algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2012, 42(17): 1236—1244.
- [14] FARHADI A, ENDRES I, HOIEM D. Describing Objects by Their Attributes[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2009, 28(30): 1778—1785.
- [15] GRANGIER D, BENGIO S. A Discriminative Kernel-based Model to Rank Images from Text Queries[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(12): 1371—1384.
- [16] PETERSON J, CAETANO T S. Reverse Multi-label Learning [J]. NIPS, 2010, 35(17): 803—806.
- [17] GUILANMIN M, MENSINK T, VERBEEK J. Discriminative Metric Learning in Nearest Neighbor Models for Image Auto-annotation[J]. ICCV, 2009, 20(12): 802—806.
- [18] KANNAN A, MOHAN V, ANBAZHAGAN N. An Effective Method of Image Retrieval Using Image Mining Techniques [J]. The International Journal of Multimedia & Its Applications (IJMA), 2010, 2(4): 17—26.
- [19] ZHU Wei-na, DREWES J, GEGENFURTNER K R. Animal Detection in Natural Images: Effects of Color and Image Database[J]. PLOS, 2013, 8(10): 78516—78522.
- [20] GRANGIER D, BENGIO S. A Discriminative Kernel-based Model to Rank Images from Text Queries[J]. Pattern Analysis and Machine, 2007, 30(8): 1371—1384.

(上接第 56 页)

- LI Jin-quan, DUAN Bing-lei, LI Zhong-ming. Analysis on Workspace and Influence Coefficients of a Proposed Palletizing Robot[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(6): 78—81.
- [12] 马丽娟. 模糊控制算法在定量包装机中的应用[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 92—94.  
MA Li-juan. Application of Fuzzy Control Algorithm in Quantificational Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 92—94.
- [13] 苏绍兴, 黄金梭. 模糊 PID 控制在复合纸板分切机速度控制中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 80—84.  
SU Shao-xing, HUANG Jin-suo. Application of Fuzzy-PID in Crosscut Feeding Speed Control of the Composite Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 80—84.
- [14] 苏绍兴, 黄金梭. 模糊 PID 控制在复合纸板分切机速度控制中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 80—84.  
SU Shao-xing, HUANG Jin-suo. Application of Fuzzy-PID in Crosscut Feeding Speed Control of the Composite Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 80—84.
- [15] HANG C C, SIN K K. A Comparative Performance Study of Auto-tuners[J]. Control System Magazine, 1991, 11(5): 41—47.
- [16] SERVET S, MEHMET K, HASAN A. Design and Simulation of Self-tuning PID-type Fuzzy Adaptive Control for an Expert HVAC System[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 4566—4573.
- [17] WANG Tai-yong, XU Ai-fen, ZHAO Li. Safety of Wall Robot's Vacuum System on Redundant Control Theory[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41: 261—263.
- [18] 徐湘元. 自适应控制理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
XU Xiang-yuan. Adaptive Control Theory and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.