

无参考图像质量评价研究现状与前景分析

单月, 刘段, 万晓霞

(武汉大学 图像传播与印刷包装研究中心, 武汉 430072)

摘要: **目的** 为了进一步掌握无参考图像质量评价的发展过程与研究热点, 为后续的相关研究提供参考。

方法 使用 citespace 文献可视化软件对 2000—2021 年在 Web of Science 检索到的 1 712 条文献数据进行基本分析、共被引分析和关键词分析, 通过分析可视化图谱来得到无参考图像质量评价的发展特点。

结果 分析表明无参考图像质量评价目前正处于高速发展阶段, 全世界各科研强国均在该领域有所建树, 目前也已存在较为成熟的无参考图像评价算法, 但其精度相较于主观评价仍有差距。**结论** 未来研究人员应该结合当今的人工智能技术推动无参考图像质量评价从高速发展向高质量发展转变。

关键词: 图像质量评价; 无参考图像质量评价; CiteSpace; 特征提取; 自然场景统计; 文献计量分析

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)13-0296-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.037

Current Research Status and Prospect of No-reference Image Quality Assessment

SHAN Yue, LIU Duan, WAN Xiao-xia

(Research Center of Image Communication and Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

ABSTRACT: The work aims to further understand the development process and research hotspots of no-reference image quality assessment and provide reference for subsequent related research. CiteSpace literature visualization software was used to conduct basic analysis, co-citation analysis and keyword analysis on 1 712 items of literature retrieved from Web of Science from 2000 to 2021. The development characteristics of no-reference image quality assessment were obtained by analyzing the visualization atlas. The analysis results showed that no-reference image quality assessment was currently in a stage of rapid development, and countries all over the world had made achievements in this field. At present, there were more mature no-reference image assessment algorithms, but there was still a gap in accuracy compared with subjective assessment. In the future, researchers should combine today's artificial intelligence technology to promote the transition from high-speed development to high-quality development of no-reference image quality assessment.

KEY WORDS: image quality assessment; no-reference image quality assessment; CiteSpace; feature extraction; natural scene statistics; bibliometric analysis

互联网时代的到来使数字图像成为日常生活中最容易捕获的信息之一。在过去的几十年中, 随着数字媒体设备使用覆盖率的不断增高, 数字图像的数量也逐渐攀升。数字图像在存储、传输、调用和再现的过程中不可避免的会遇到各种各样的失真, 如何有效地进行失真图像质量评价就成为了研究人

员关注的热门话题。成熟且准确的图像质量评价模型可以应用于遥感信息^[1-3]、医学影像^[4]、图像复原^[5]等领域。

图像质量评价 (Image Quality Assessment, IQA) 分为主观评价和客观评价 2 类。主观评价^[6]即根据人的主观视觉体验来判断图像质量的好坏。客观评价则

收稿日期: 2020-12-24

作者简介: 单月 (1997—), 女, 武汉大学硕士生, 主攻无参考图像质量评价和色域映射图像质量。

通信作者: 万晓霞 (1965—), 女, 武汉大学教授、博导, 主要研究方向为颜色科学和信息系统。

是利用计算机来模拟人眼视觉系统 (Human Visual System, HVS), 对待测图像进行相关特征分析来获得图像质量的客观评价分数。主观评价准确但稳定性不强, 易受到环境影响, 且无法嵌入至计算机软件中, 而客观评价方法既可以与人眼视觉结果保持基本一致, 又可以嵌入软件实现对图像的实时处理。

客观评价根据是否利用参考图像分为: 全参考图像质量评价方法 (Full-reference IQA, FR-IQA)、半参考图像质量评价方法 (Reduced-reference IQA, RR-IQA) 和无参考图像质量评价方法 (No-reference IQA, NR-IQA)^[7-9]。由于现实场景中多数情况需要在未知原始图像的情况下对失真图像进行评价, 所以近年来无参考类图像质量评价方法成为了该领域研究的重点方向。

对目前现有的文献进行分析, 可以有助于了解无参考图像质量评价的发展过程及主要进展, 摸清该领域目前存在的问题, 掌握未来的发展趋势。通过 CiteSpace 呈现可视化知识图谱是进行文献分析的重要方法, 它利用统计学的原理与技术对文献进行定量分析, 得到更具说服力的结果。文中将对无参考图像质量评价进行可视化分析, 第 1 部分介绍了数据的来源与分析方法, 第 2 部分介绍了无参考图像质量评价的时间、地域、领域与期刊等基本统计信息的分析, 第 3 部分将对领域内的高被引文献进行分析与介绍, 第 4 部分通过分析关键词得到无参考图像质量评价的发展趋势, 第 5 部分总结无参考图像质量评价的发展特点, 讨论无参考图像质量评价存在的问题与未来的发展方向。

1 数据来源与研究方法

文中的数据来源于 Web of Science (WOS) 核心数据库, 以“TS=NRIQA OR TS=BIQA OR TS=Blind Image Quality Assessment OR TS=No-Reference Quality

Assessment”为检索主题, 以 2000—2021 年为检索时间跨度, 以 article 和 review 为文献类型, 以英文为文献语种进行检索, 共获得检索记录 1 712 条。通过对检索结果筛选与除重, 最终获得有效文献 1 712 条。

文中主要采用文献计量的方法来对无参考图像质量评价进行研究, 分析方法见图 1, 首先使用 WOS 的检索分析工具对无参考质量评价的时空分布、学科领域分布及文献来源进行统计分析。其次, 使用 CiteSpace5.7.R5 对下载并除重后的 1 712 条文献进行期刊共被引分析、文献共被引分析及关键词分析。使用 2 种分析方式一方面了解无参考图像质量评价的发展基本情况, 另一方面也通过可视化知识图谱来总结无参考图像质量评价的发展热点与前景。

citespace 进行可视化分析中经常以中介中心性衡量某一测度节点在网络中的重要性^[10]。中介中心性的核心思想是: 如果一个节点位于其他节点的多条最短路径上, 那么该节点就处于核心地位, 即具有较大的中介中心性的节点其重要性就越大, 中介中心性大于 0.1 的节点通常被称作关键节点, 在可视化知识图谱中使用紫色环表示中介中心性高的节点。中介中心性的计算公式如下:

$$C_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}} \quad (1)$$

式中: g_{st} 为从节点 s 到节点 t 的最短路径数目; n_{st}^i 为从节点 s 到节点 t 的 g_{st} 条最短路径中经过节点 i 的最短路径数目。

2 基本分析

通过对文献进行基本的时空分析、学科领域分析、机构分析与发布期刊分析可以清晰地了解该领域的发展过程, 有助于对研究对象有更深刻的了解。

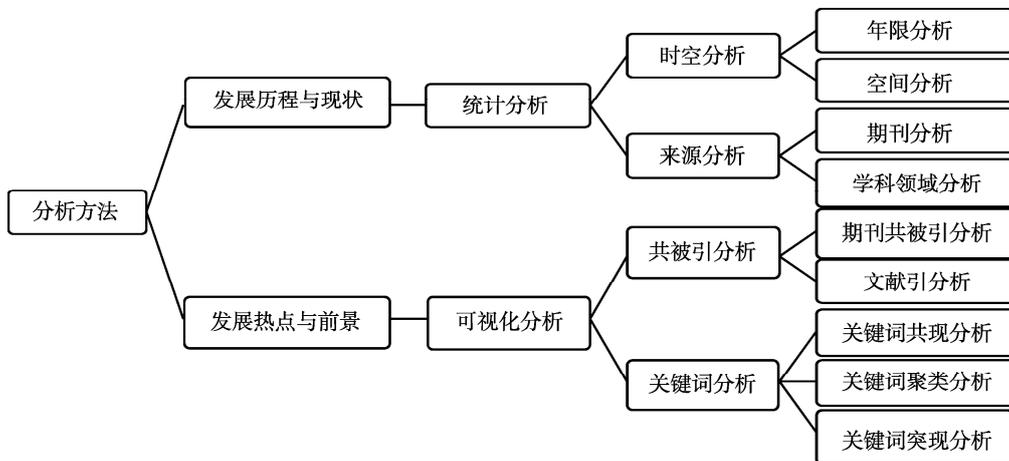


图 1 文中分析方法
Fig.1 Analysis method used in this work

2.1 时空分析

文献的历年发布数量可以直观的体现无参考图像质量评价的发展情况,从图2的2000—2021年发文量统计可以看出无参考图像质量评价领域的发文量基本呈现逐年上升趋势,根据每年的发文量可以将其发展阶段分为3部分:第1阶段2000—2004年,无参考图像质量评价的起步阶段,发文量较少但相对稳定每年基本均有10篇文献产出;第2阶段2005—2010年,稳步增长阶段,发文量虽然总数仍然不多但较前一阶段有明显增长,平均每年有29篇文献;第3阶段2011年至今,这一阶段的发文量属于飞速增长时期,其中2018—2020年的单年发文量已经突破200篇,且仍处于上升趋势。从3个发展阶段可以看出无参考图像质量评价的热度在持续攀升,是相关研究领域的热点话题。

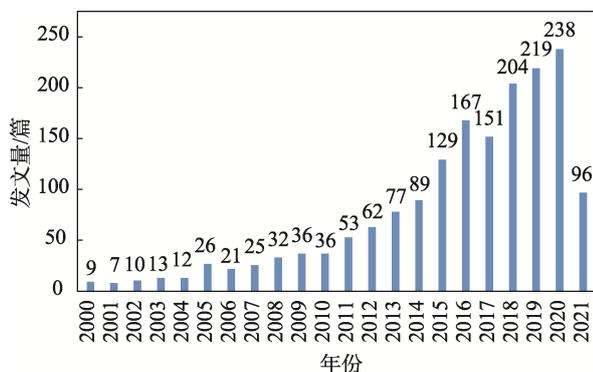


图2 2000—2021年发文量统计

Fig.2 Statistics of publication volume from 2000 to 2021

从图3各国的发文量统计可以看出在无参考图像质量评价领域,中美两国的发文量领先,其中中国以超过500篇的发文量位居第1,德国虽然排在第3,但与排名前2名的发文量差距有近300篇。

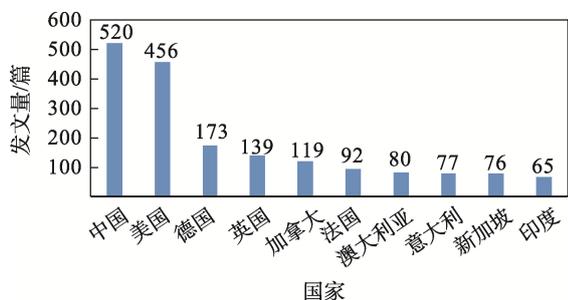


图3 发文量排名前10的国家

Fig.3 Top ten countries in terms of publication volume

反观图4的中介中介性的排名,发文量位居前3的国家在中介中心性排名中没有都在前10的名单里,中介中心性前3名分别是美、英、法,其中美国的中介中心性更是超过了0.3。从发文量和中心中介

性的统计可以看出虽然有的地域发文量不大,但所发文献的重要性却极高,也说明在进行大量研究的同时要更注重无参考图像质量评价的高质量发展。

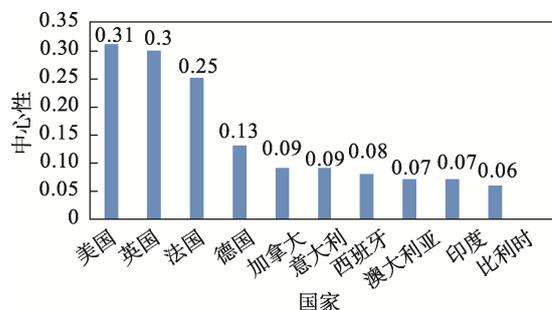


图4 中介中心性排名前10的国家

Fig.4 Top ten countries for intermediary centrality

2.2 作者分析

从图5的作者的合作网络可以发现无参考图像质量评价领域的作者们大多有固定的合作团队,由于整张图谱没有存在独立分散的结构,证明各团队之间是存在合作交流。这种类似于“大杂居,小聚居”的作者分布模式,让无参考图像评价领域的发展更为紧密,相互合作交流使得领域可以快速发展。

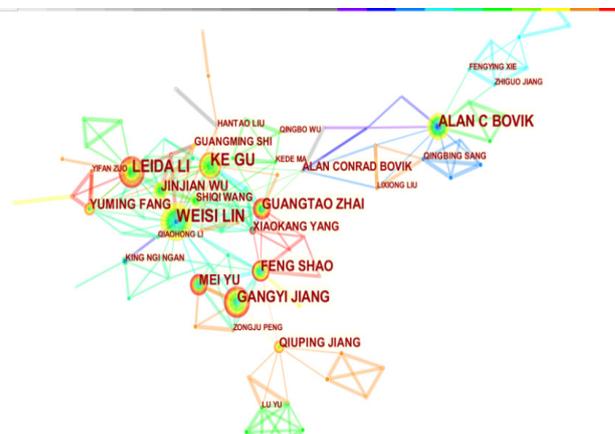


图5 作者合作分析图谱

Fig.5 Atlas of authors' collaboration analysis

2.3 机构分析

对图6所示的文献来源可视化图谱分析得出无参考图像质量评价的研究机构众多,各国的顶尖高校都有相关学术论文的产出的结论。统计了发文量前10的机构的中介中心性与发文篇数见图7,其中发文量最多的三所高校分别是南洋理工大学、西安电子科技大学和得克萨斯州大学奥斯汀分校,发文量均超过了50篇,但中介中心性最高的哈佛大学发文量只有20余篇,这反映发文量的多少与重要性并不完全成正比关系。

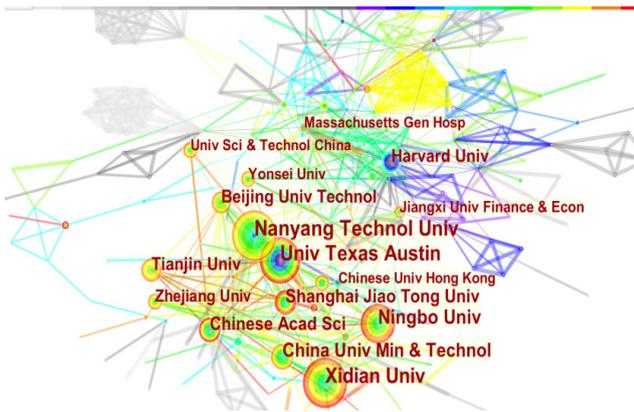


图 6 文献来源可视化图谱
Fig.6 Visual atlas of literature sources

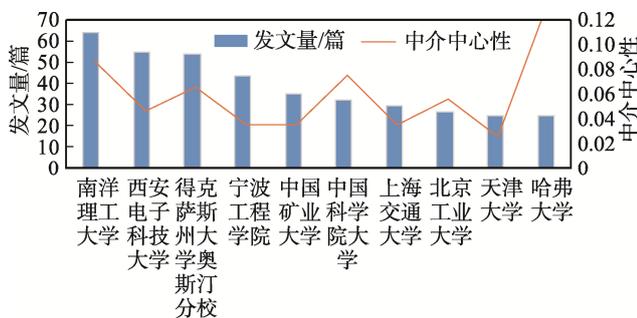


图 7 发文量前 10 的机构发文量与中介中心性
Fig.7 Top ten organizations with publication volume and intermediary centrality

2.4 学科领域分析

使用 WOS 的检索分析工具对无参考图像质量评价的学科领域分布进行了统计, 统计结果见图 8, 发文量最高的领域是电子工程, 其次是医学影像和计算机信息系统领域。除此之外在人工智能、软件工程、电子信息等领域也有所研究, 可以看出无参考图像质量评价在众多领域均有所研究, 是一门综合性的学科。

2.5 期刊分析

使用 WOS 的检索分析工具对无参考图像质量评价进行发文期刊的统计, 其中发文量最高的期刊是《IEEE Transactions on Image Processing》。

对发文期刊使用 citespace 软件进行了共被引分析, 中介中心性可以反映期刊在无参考图像质量评价领域的权威性, 中心性越高就证明其在领域内的地位越高。总结了中介中心性最高的 10 篇期刊, 见表 1, 这 10 篇文章大多属于发展的前期阶段, 这也说明了前期的稳步发展为后期无参考图像质量评价的飞速上升奠定了良好的理论基础。

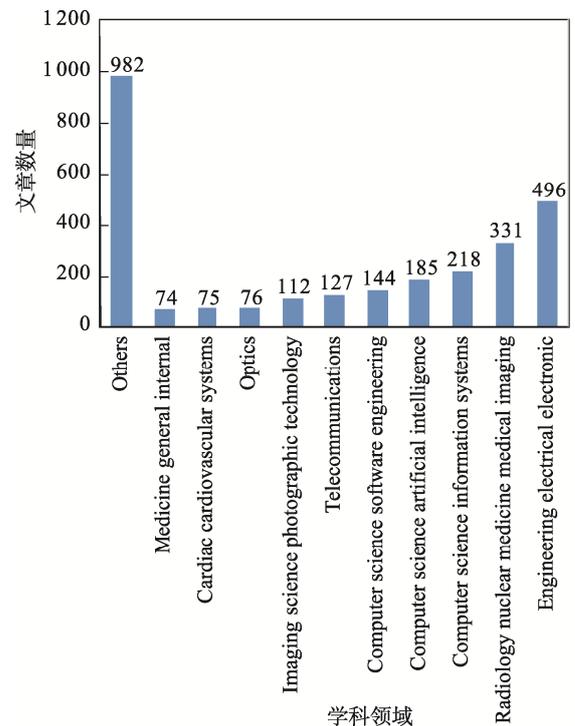


图 8 文献所在学科领域统计
Fig.8 Statistical graphs of subject area of literature

表 1 中介中心性前 10 的共被引期刊统计
Tab.1 Top ten co-cited journals of intermediary centrality

序号	期刊名称	年份	中介中心性
1	Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of Ame	2006	0.25
2	Magnetic Resonance in Medicine	2002	0.16
3	P IEEE	2005	0.14
4	Archives of Physical Medicine and Rehabilitation	2007	0.14
5	BMJ-British Medical Journal	2002	0.11
6	Journal of Physiology-London	2015	0.11
7	IEEE Transactions on Medical Imaging	2007	0.1
8	Lancet	2000	0.09
9	Annual Review of Neuroscience	2000	0.08
10	Physics in Medicine and Biology	2015	0.08

3 文献共被引分析

使用 *citespace* 对文献进行共被引分析可以了解领域内的高被引文献,高被引文献通常可以代表领域的发展方向^[11],对高被引文章按照被引频率排序,总结了被引用次数最多的 9 篇文献的题目、中介中心性、年份以及研究主题,见表 2。

表 2 统计的高共被引文献全部发表于 2011—2015 年这 5 年中,此阶段正是无参考图像质量评价发展的加速阶段,该阶段做到了高速发展的同时兼顾高质量发展。被引用量最高的^[12]文献提出了一种基于空间亮度信息的无参考图像质量评价算法 (BRISQUE 算法),该算法提取了图像的亮度信息,对亮度信息进行除法归一化处理,使用广义高斯模型^[13]对数据进行拟合,提取模型参数 (MSCN 系数)作为图像特征,与人眼视觉主观评分进行支持向量回归训练,生成评价模型。由于 BRISQUE 算法中使用到的 MSCN 系数这一亮度特征效果极佳,之后的改进算法基本都会以它作为特征向量中一部分,所以该文献的引用次数排名第 1。

其次被引用量较高的 NIQE 算法^[14]与 ILNIQE 算法^[15]均为无监督式无参考质量评价算法。无参考图像质量评价分为有监督和无监督 2 种,有监督评价模型如 BRISQUE 算法的基本原理是提取图片的某些特征参数与标准数据库中记录的人眼视觉主观评分做回归训练得到预测模型;而无监督评价模型的基本原理则是通过对自然图像的某些特征建模获得标准图像的参数,对失真图像进行同样的建模得到失真图像的参数,对失真参数与标准参数进行对比从而得到图像的质量评分。此类算法不需要人眼视觉主观评分作为参考,因此在训练模型时对数据库无特定要求,跨数据库测试稳定性较高。

引用次数最高的 3 篇文献提取的均为图像空间

域特征,被引用频率排名第 4 名的 BLIINDS-II^[16]算法则是基于离散余弦变化的频率域进行特征提取无参考质量评价算法。与 BLIINDS-II 算法同样使用频率域特征的还有 2011 年提出的基于小波变化的 DIIVINE 算法^[17]。从表 2 统计的发文时间可以看出无参考质量评价模型是从基于频率域特征逐渐转换至基于空间域特征,这是由于基于频率域变换的算法涉及到空域与频域的转换,使算法运行速度较慢,同时图像失真大多是空间结构发生变化,所以自然图像在空间域上存在着更多的统计特征。

除了以上几种经典算法,高被引算法还包括 14 年提出的基于梯度幅值与拉普拉斯特征联合统计的无参考失真图像质量评价模型^[18]和基于自由能理论的 NFERM 算法^[19]。从表 2 的分析中不难发现,除了对描述算法的文献,还有 2 篇与算法相关的工具类文献引用频率较高。Ponomarenko 等^[20]详细介绍了无参考图像质量评价训练预测中使用到的 TID2013 数据库,Kang 等^[21]介绍了用于无参考质量评价的卷积神经网络模型,这 2 篇文献不是从原理上介绍无参考图像质量评价算法,是为无参考图像质量评价领域提供更有效的处理工具。

从对高被引文献的分析可以看出领域内重点的发展方向还是提出更为有效的评价模型,无论是对算法中所提取的特征进行改进,对训练数据库的优化,还是对训练算法的选择都是为了使模型可以在高效运行的情况下获得与人眼视觉更为一致的结果。

4 主题与趋势分析

关键词是对文章内容的高度概括,对关键词进行分析可以更好地掌握领域内的研究中心,因此为了更好地了解无参考图像质量评价的热点话题,使用 CiteSpace 对 1 712 的文献进行了进行关键词分析。

表 2 高共被引文献统计分析
Tab.2 Highly co-cited journals

序号	中介中心性	篇名	年份	文献主题
1	0.01	No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain	2012	BRISQUE 算法
2	0.01	A Feature-Enriched Completely Blind Image Quality Evaluator	2015	ILNIQE 算法
3	0.01	Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer	2013	NIQE 算法
4	0.02	Blind Image Quality Assessment: A Natural Scene Statistics Approach in the DCT Domain	2012	BLIINDS-II 算法
5	0.03	Using Free Energy Principle For Blind Image Quality Assessment	2015	NFERM 算法
6	0.01	Blind Image Quality Assessment: From Natural Scene Statistics to Perceptual Quality	2011	DIIVINE 算法
7	0.01	Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives	2015	TID2013 数据库
8	0.02	Blind Image Quality Assessment Using Joint Statistics of Gradient Magnitude and Laplacian Features	2014	基于梯度与拉普拉斯的 BIQA 算法
9	0.03	Convolutional Neural Networks for No-Reference Image Quality Assessment	2014	卷积神经网络

4.1 关键词共现分析

为了了解领域内的研究中心, 先对关键词进行了共现分析, 结果见图 9。可见无参考图像质量评价领域涉及到的关键词众多且相互交错, 关键词之间基本都存在联系。

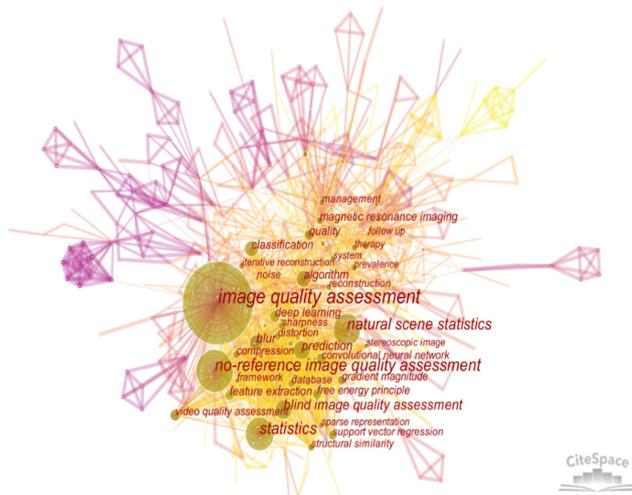


图 9 关键词共现分析可视化图谱
Fig.9 Visual atlas of keyword co-occurrence analysis

表 3 统计了出现频数最多的关键词的名称、频次和中介中心性, 表 3 中的 10 个关键词可以分为 2 类。一类是“image quality assessment”、“no-reference quality assessment”、“blind image quality assessment”和“video quality assessment”, 它们主要围绕质量评价展开, 其中的视频质量评价是目前该领域的一大热点话题, 无参考图像质量评价的原理被使用于对图像视频进行质量评价, 得克萨斯州大学奥斯汀分校的课题组就撰写了相关的算法, 如 VIDEVAL 算法^[22]。另一类则是与算法相关的“statistics”、“natural scene statistics”、“prediction”、“blur”、“algorithm”和“feature extraction”。其中自然场景统计 (Natural Scene Statistics, NSS)^[23]是算法中最为常用的原理, 自然场景统计是通过数学统计模型来拟合自然场景的特征, 自然图像的特征通常符合一定的数学统计规律, 而失真的存在会改变图像的自然统计特性, 从而使它们的自然场景统计特征变得不自然。基于自然场景统计原理的无参考图像质量评价算法就是通过捕获失真图像中的“非自然现象”来提取图像特征的。

4.2 关键词聚类分析

通过关键词共现分析初步掌握无参考图像质量评价的发展趋势与核心原理后, 文中对关键词进行聚类分析, 在调整后获得了图 10 中的 6 个聚类标签。聚类标签可以分为主旨、技术和应用 3 类。第 1 类是“#1 image quality assessment”、“#3 distortion”和

“#9 no reference” 3 个标签, 它们代表的是该领域的主旨问题, 即无参考图像的质量评价。第 2 类为技术类标签, 由“#0 support vector regression”构成^[24], 是大部分有监督式无参考图像质量评价模型的训练算法, 除了支持向量回归的训练方法, 近几年也出现了广义神经网络 (GRNN) 算法^[25]和 AdaBoosting BPNN 算法^[26], 目前的大多数研究都旨在寻找更为有效的训练方法。第 3 类则是应用方向的聚类标签, 标签#2、#7 则是无参考图像质量评价可以应用的领域, 包括分类、迭代重建等, 说明无参考图像质量评价拥有广阔的应用前景。

表 3 出现频数最多的关键词统计
Tab.3 The most frequently occurring keywords

关键词	中介中心性	频次
image quality assessment	0.5	492
no-reference quality assessment	0.03	197
statistics	0.04	136
natural scene statistics	0.03	126
blind image quality assessment	0.04	75
prediction	0.03	58
blur	0.02	57
video quality assessment	0.05	54
algorithm	0.08	50
feature extraction	0.01	40

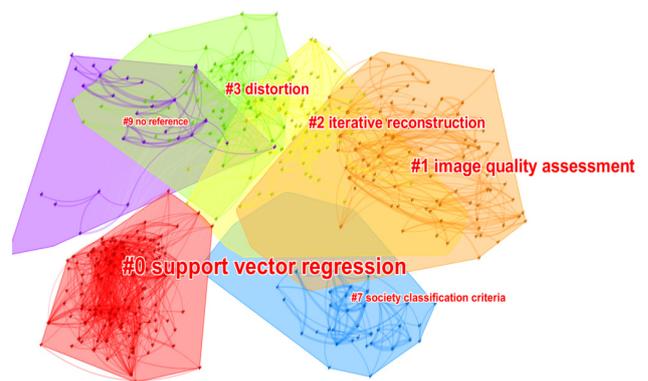


图 10 关键词聚类分析可视化析图谱
Fig.10 Visual atlas of Keyword cluster analysis

4.3 关键词突现分析

citespace 中的突现分析可以有效地探索领域发展趋势, 对无参考图像质量评价的关键词进行了突现分析, 见图 11。

从图 11 中可以看出, 随着互联网技术的发展, 深度学习、神经网络、自由能理论等新兴的技术成为了领域文献关键词的核心内容, 也预示着无参考图像质量评价的发展重心将向此方向转移。

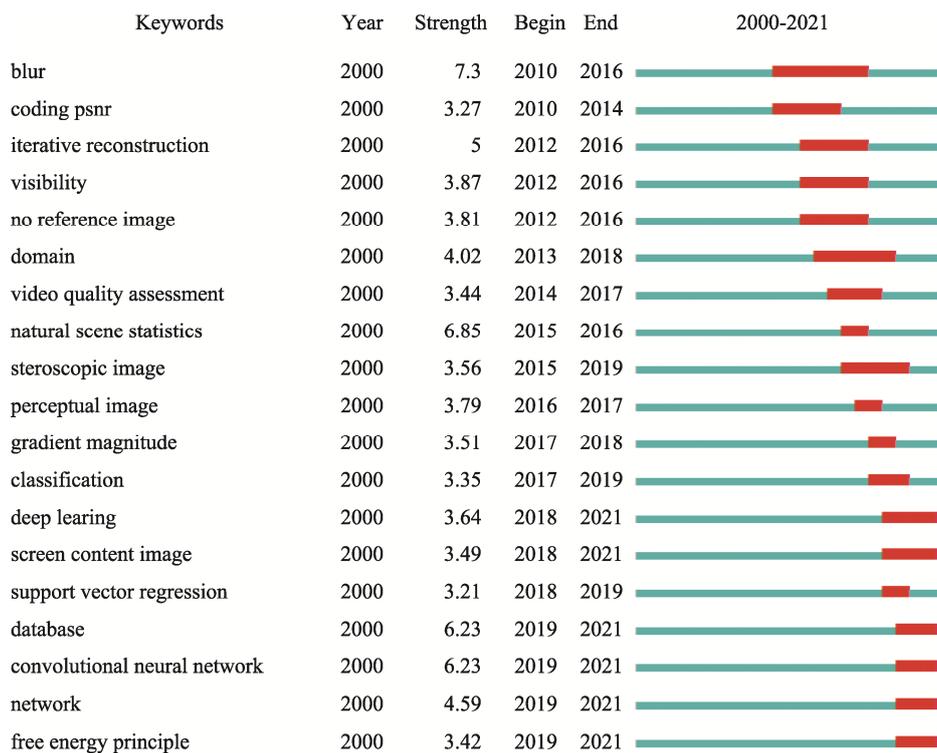


图 11 关键词突现分析结果
Fig.11 Results of keyword emergence analysis

5 讨论与总结

从基本分析、文献共被引分析和关键词分析可以得出无参考图像质量评价领域的发展特点:从时空维度来看无参考质量评价正在处于高速发展时期,各国的顶级高校都在从事相关方面的研究,且大部分相关研究人员会存在合作关系。其次从文献内容来看,无参考图像质量评价发展的重点在评价算法的改进上,只有进一步提高算法的精度才能更适合现实中图像失真的情况。从研究的主题与热点来看,提取合适的特征,使用恰当的学习算法将成为无参考图像的发展重点,同时能够模拟人眼视觉系统的脑科学领域相关原理也开始被研究人员所关注。总的来说,无参考质量评价模型正处于从高速发展向高质量发展转型阶段,更高的精度和效率成为了需要解决的核心问题。

针对目前的发展现状,对未来的发展有如下展望。

1) 需要在特征数量与运行速度上达到平衡。特征的选取是模型是否成功的关键,在未来发展中选择更为多元化的统计特征将成为重点,从高被引文献的经典算法在中不难发现目前现存的算法大多使用的是单一特征,这在一定程度上提高了算法的运行速度,却也抛弃了部分特征。例如目前已存在较为成熟的针对亮度失真类型的无参考失真图像评价模型,但色度特征的使用覆盖范围很低,由于色度信息的多样

性,没有一组数量较少但能覆盖大部分色度信息的特征组合,这使得色度特征的增加与算法运行时间无法得到平衡,在特征数量与运行速度上达到平衡是无参考图像评价领域发展的核心问题。

2) 扩展应用范围,选取更为合适的训练数据。数据库是出现频次很高的关键词,目前使用的训练数据库虽然在文献仿真测试中效果较好,但并不能很好地服务于真实场景。数据库中的图像多是单一失真类型,与现实生活中常见的多元失真有较大差别,因此可以创建新的数据库,采用更贴近现实失真情况的图片来作为训练数据集。

3) 加强无参考图像质量评价与人工智能的结合,从无参考图像的发展历程可以看出它是一门与时俱进的学科,如何将现阶段最先进的人工智能算法融入评价模型是一大热点问题。应该积极探索寻找更高效的训练模型算法提高无参考失真图像评价算法的准确性和泛化能力。

6 结语

文中通过对无参考图像质量评价领域 1 712 篇文献进行基本分析、共被引分析和关键词分析总结了无参考图像质量评价发展的现状与前景,指出了无参考图像质量评价在高速发展的同时应该进一步向高质量发展转型,不断拓宽应用领域,提高算法精度,为今后无参考图像质量评价模型的发展提供了参考。

参考文献:

- [1] 郭从洲, 李可, 李贺, 等. 遥感图像质量等级分类的深度卷积神经网络方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): 1-9[2021-06-18]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200292>.
GUO Cong-zhou, LI Ke, LI He, et al. Deep Convolution Neural-Network Method for Remote Sensing Image Quality Classification[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University: 1-9[2021-06-18]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200292>.
- [2] 徐琳. 基于卷积神经网络的遥感图像质量评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 10-15.
XU Lin. Research on Remote Sensing Image Quality Evaluation Based on Convolution Neural Network[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019: 10-15.
- [3] 闫钧华, 白雪含, 张寅, 等. 融合多特征的无参考复原遥感图像质量评价[J]. 电子设计工程, 2019, 27(12): 1-7.
YAN Jun-hua, BAI Xue-han, ZHANG Yin, et al. No-Reference Recovered Remote Sensing Image Quality Assessment Based on Fusion of Multiple Features[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(12): 1-7.
- [4] 孙记航, 张祺丰, 李昊岩, 等. 基于模型及自适应统计迭代重建优化儿童腹部低剂量 CT 血管造影图像质量[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(5): 749-753.
SUN Ji-hang, ZHANG Qi-feng, LI Hao-yan, et al. Optimization of Image Quality of Abdominal Low Dose CT Angiography in Children Based on Model and Adaptive Statistical Iterative Reconstruction[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2021, 37(5): 749-753.
- [5] 王烁, 余伟, 田传耕. 基于多阶结构表示的超分辨率重构图像质量盲评价方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(2): 280-288.
WANG Shuo, YU Wei, TIAN Chuan-geng. Blind Quality Metric of Super-Resolution Reconstructed Images Based on Multi-Order Structure Representation[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(2): 280-288.
- [6] LEE D. Towards a Perceptual Image Quality Assessment Framework for Color Data[D]. Toronto: University of Toronto, 2017: 1-5.
- [7] ZHOU Yu, LI Lei-da, WU Jin-jian, et al. Blind Quality Index for Multiply Distorted Images Using Bioriented Structure Degradation and Nonlocal Statistics[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(11): 3019-3032.
- [8] ZHOU Y, LI L, WANG S, et al. No-Reference Quality Assessment for View Synthesis Using DoG-Based Edge Statistics and Texture Naturalness[J]. Transactions on Image Processing, 2019, 28(9): 4566-4579.
- [9] CHANDLER D M, LI S, LIN C S, et al. Seven Challenges in Image Quality Assessment: Past, Present, and Future Research[J]. ISRN Signal Processing, 2013, 20(5): 1-53.
- [10] 程晏萍, 黄千芷, 董慈蔚. 大数据在供应链管理中应用的研究现状——基于 CiteSpace 的知识图谱分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2021, 55(3): 453-461.
CHENG Yan-ping, HUANG Qian-zhi, DONG Ci-wei. The Application of Big Data in Supply Chain Management: Knowledge Mapping Analysis Based on CiteSpace[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2021, 55(3): 453-461.
- [11] 郑焯, 任牡丹, FOUNTAIN J E. 基于文献计量的中外人工智能政策研究现状及启示[J]. 情报杂志, 2021, 40(1): 48-55.
ZHENG Ye, REN Mu-dan, FOUNTAIN J E. Current Status and Enlightenment of Chinese and Foreign Artificial Intelligence Policy Research Based on Bibliometric Analysis[J]. Journal of Intelligence, 2021, 40(1): 48-55.
- [12] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12): 4695-4708.
- [13] SHARIFI K, LEON-GARCIA A. Estimation of Shape Parameter for Generalized Gaussian Distributions in Subband Decompositions of Video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5(1): 52-56.
- [14] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer[J]. IEEE Signal Process Lett, 2013, 20(3): 209-212.
- [15] ZHANG Lin, ZHANG Lei, BOVIK A C. A Feature-Enriched Completely Blind Image Quality Evaluator[J]. IEEE Trans Image Process, 2015, 24(8): 2579-2591.
- [16] SAAD M A, BOVIK A C, CHARRIER C. Blind Image Quality Assessment: A Natural Scene Statistics Approach in the DCT Domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3339-3352.
- [17] MOORTHY A K, BOVIK A C. Blind Image Quality Assessment: From Natural Scene Statistics to Perceptual Quality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3350-3364.
- [18] XUE Wu-feng, MOU Xuan-qin, ZHANG Lei, et al. Blind Image Quality Assessment Using Joint Statistics of Gradient Magnitude and Laplacian Features[J]. IEEE

- Transactions on Image Processing, 2014, 23(11): 4850-4862.
- [19] GU Ke, ZHAI Guang-tao, YANG Xiao-kang, et al. Using Free Energy Principle for Blind Image Quality Assessment[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2015, 17(1): 50-63.
- [20] PONOMARENKO N, JIN L, IEREMEIEV O, et al. Image Database TID2013: Peculiarities, Results and Perspectives[J]. Signal Process-Image Commun, 2015 (30): 57-77.
- [21] KANG Le, YE Peng, LI Yi, et al. Convolutional Neural Networks for No-Reference Image Quality Assessment[C]// IEEE Conference on Computer Vision And Pattern Recognition, OH, 2014: 1733-1740.
- [22] TU Zheng-zhong, WANG Yi-lin, BIRKBERK N, et al. UGC-VQA: Benchmarking Blind Video Quality Assessment for User Generated Content[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 4449-4464.
- [23] SHEIKH H R, BOVIK A C, DE VECIANA G. An Information Fidelity Criterion for Image Quality Assessment Using Natural Scene Statistics[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2117-2128.
- [24] MOORTHY A K, BOVIK A C. A Two-Step Framework for Constructing Blind Image Quality Indices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 513-516.
- [25] LI Chao-feng, BOVIK A C, WU Xiao-jun. Blind Image Quality Assessment Using a General Regression Neural Network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(5): 793-799.
- [26] 余伟, 徐晶晶, 刘玉英, 等. 基于自然场景统计的色域映射图像无参考质量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 69-78.
- YU Wei, XU Jing-jing, LIU Yu-ying, et al. No-Reference Quality Evaluation for Gamut Mapping Images Based on Natural Scene Statistics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 69-78.

责任编辑: 曾钰婵