

静态图像压缩标准中的可分级编码技术^{*})

王相海

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)

(信息安全国家重点实验室(中国科学院研究生院) 北京 100039)

摘要 图像渐进传输、多质量服务以及图像数据库浏览等多分辨率环境下的多媒体应用导致了图像可分级编码思想的产生。本文首先对静态图像可分级编码的含义和种类进行了分析,然后对主要静态图像压缩国际标准中的可分级编码技术进行了综述,最后对图像编码技术的发展方向进行了展望。

关键词 图像,可分级编码,国际标准

The Scalable Coding Algorithms in Image Compression Standards

WANG Xiang-Hai

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

(State Key Laboratory of Information Security(Graduate School of Chinese Academy of Sciences), Beijing 100039)

Abstract The multimedia applications in a multiresolution environment, such as progressive transmission of image, image database browsing, ect., arise scalable image coding algorithm. This paper firstly explains the concepts of all kinds of image scalable coding, and gives an overview for the scalable image coding algorithms in international standards. Finally, the future development of image coding is also analyzed and conjectured in the paper.

Keywords Image, Scalable coding, International standard

1 引言

在许多实际应用中,由于用户要求不同、终端能力不同、异构网络的不同支路所能提供的 QoS 不同或网络传输条件的变化(比如噪声、拥塞等)等原因,需要提供不同质量的图像信号。解决此类问题的最好方法,是用单个编码器产生分层次的压缩码流,对不同层次的码流解码可以获得不同的图像质量。例如,低档次终端只对码流的一部分进行解码,获得低分辨率的图像;处理能力高的终端对整个码流进行解码,获得高分辨率的图像。这种编码机制通常称为可分级编码。

图像的可分级编码机制在早期图像国际标准 JPEG^[1] 中就已经体现,只不过当时没有明确说明。到了近期的 JPEG-2000^[2],这一编码思想被明确提了出来,并且得到了进一步发展。本文首先对图像可分级编码技术的概念和种类进行介绍,然后对目前常用的图像压缩国际标准中的可分级编码技术的思想和方法进行分析、讨论和比较,最后对图像编码技术的发展方向进行展望。

2 图像可分级编码的概念及种类

一个图像编码的比特流具有可分级性(Scalability),是指利用该比特流的一部分(或子集)可以产生对该图像一个有用表示的能力,即解码器能够根据分辨率等情况对码流的一部分进行解码。图像的可分级编码主要包括以下情况:空间分辨率可分级编码、数率可分级(或称 SNR 可分级)编码、空间和数率混合可分级编码以及 ROI(Region of Interest)可分级编码等。

图像数率可分级指对一个压缩的码流,用户可根据带宽或系统能力的具体情况从码流的开始端来截取相应的一段码流进行解码。在对码流的截取过程中,如果可在一定范围内任意选择数率,则此时的数率可分级被称为连续数率可分级(参见图 1)。数率可分级又称质量可分级。

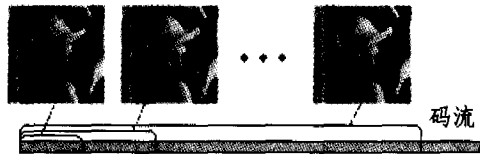


图 1 图像数率可分级示意图

图像的空间分辨率可分级指以不同空间分辨率对图像进行解码(参见图 2)。

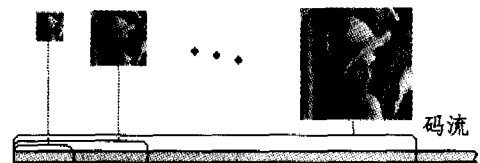


图 2 图像空间可分级示意图

除了单独的数率可分级和空间可分级编码方案外,二者还可以混合使用,形成图像的数率可分级与空间可分级的混合编码方案,即码流在总体上实现基于分层的空间可分级编码情况下,对每一层次的空间可分级图像码流,又可实现其数率可分级解码(参见图 3),这在一定程度上提高了可分级的

^{*})国家自然科学基金(60372071)、辽宁省自然科学基金(20032105)、大连市科技基金和辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助。王相海 博士,教授,主要研究领域为 CG、CAGD、图像编码和多媒体信息处理。

灵活性。

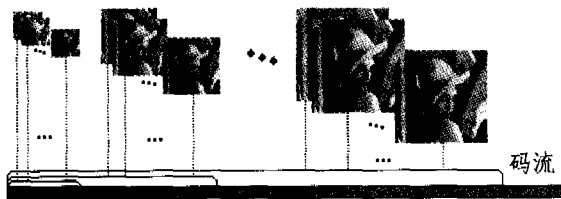


图3 图像空间与数率混合可分级示意图

图像的 ROI 可分级编码技术是指在图像编码码流中,允许图像的某一部分(即感兴趣区域)以更好的质量被解码(参见图4)。

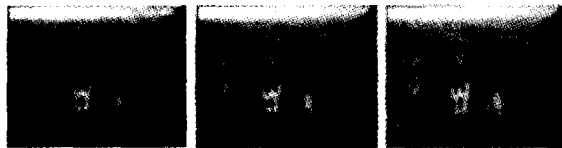


图4 以左上角矩形区域为“感兴趣区域”的 ROI 可分级解码图像

3 图像压缩国际标准中的可分级编码技术分析

目前重要而常见的静态图像压缩国际标准包括 JPEG^[1]、PNG^[5]、JPEG-LS^[6]、JPEG-2000^[2] 和 MPEG4-VTC^[7],其中 JPEG-LS 是静态图像无损编码的 ISO/ITU-T 标准,它也提供“几乎无损”的编码机制。该标准采用了基于自适应预测、上下文建模和 Golomb 编码的编码模式,还设置了一个“平坦”区域探测器,对这些区域采用了游程编码方式。它的“几乎无损”压缩是通过允许一个固定的最大取样误差来实现的。整个方案在保证高无损压缩率的同时,具有较低的复杂性,但该标准没有提供可分级和误差恢复等特性。具体内容参见文[6]。以下我们对其它标准中的可分级编码情况进行分析和讨论。

3.1 JPEG 中的图像可分级编码分析

JPEG 是国际上彩色、灰度、静止图像的第一个国际标准,它以 DCT 作为编码工具,提供了四种图像编码模式:顺序编码、累进编码、无失真编码和分层编码。尽管标准中还没有明确提出图像可分级编码的概念,但提供的累进编码和层次编码模式则分别对应了前面所介绍的数率可分级和空间可分级编码方式。

JPEG 中的累进编码,是为了在解码过程中能在屏幕上逐步浮现重建的图像,改善人机交互效果。它的原理如图5所示。

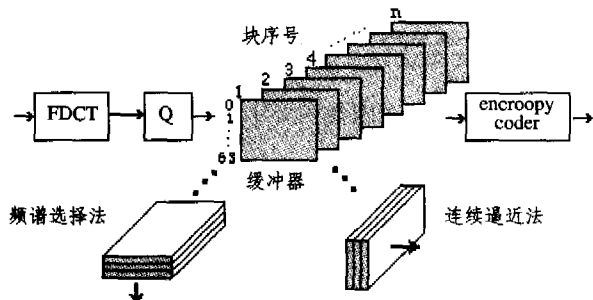


图5 JPEG 的累进编码模式

JPEG 编码器中有一个缓冲器,在累进编码模式时,缓冲

器的容量需要能存储图像中的全部 n 个子块数据,等待所有子块数据都到达缓冲器之后,把它们组织成一个数据长方体,然后可采用两种方式实现累进编码:一种是频谱选择法,即将数据长方形按水平方向切片,自上而下(从低频数据到高频数据)数据送给熵编码器进行编码;第二种是连续逼近法,即将数据长方体按竖直方向切片,自左向右(从高位数据到低位数据)将数据送给熵编码器去编码。

JPEG 层次编码模式是为了适应各种不同分辨率的显示器展现图像的需要,用户在解码时只要从网络上接收能满足分辨率要求的数据即可,不必接收编码图像的全部数据。其编码器原理如图6所示。

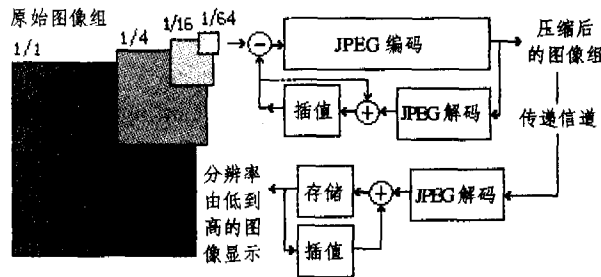


图6 JPEG 的层次编码模式

JPEG 的层次编码模式首先把原始图像的分辨率逐级降低,得到一组分辨率由低到高的图像,然后对最低的图像进行 JPEG 编码,同时对该图像进行解码,并利用插值方法提高其分辨率,作为高级分辨率原始图像的预测图像;求出预测图像与相应原始图像的差值图像,并对差值图像进行 JPEG 编码。

3.2 PNG 中的可分级编码分析

PNG 现行版本是国际标准 (ISO/IEC 15948:2003),并在 2003 年 11 月 10 日作为 W3C 建议发布。PNG 图像文件格式是 90 年代中期由 W3C 开发而成的,目的是替代 GIF。PNG 的发展过程如下^[8]:其 1.0 版本规范于 1996 年 7 月 1 日发布,后来被称为 RFC2083 标准,并在 1996 年 10 月 1 日成为 W3C 建议;PNG 的 1.1 版本进行了部分小幅修改并增加了三个新的数据块定义,于 1998 年 12 月 31 日发布;PNG 的 1.2 版本增加了另外一个数据块,于 1999 年 8 月 11 日发布。PNG 使用了从 LZ77 派生的一个非专利无损数据压缩算法(名为 deflation),这个算法对图像里的直线进行预测然后存储颜色差值,这使得 PNG 经常能获得比原始图像甚至比 GIF 更大的压缩率。PNG 能支持 48 位真彩色图像以及 16 位灰度图像;在 24 位彩色的模式下,支持 8 位的 alpha 通道,使图像的透明度可以调节。最新的 PNG 标准还允许在一个文件内存储多幅图像。此外,PNG 可使在通信链路上传输图像文件的同时就在终端上显示图像,把整个轮廓显示出来之后,逐步显示图像的细节。也就是先用低分辨率显示图像,然后逐步提高它的分辨率,即具有数率可分级的特性。

PNG 的数率可分级显示是通过一种渐进的高速交织(interlaced)的显示方式来实现的,对整个图像的逼近显示是基于当前所接收到的数据量的多少,其中一个简单而有效的方法是通过利用每一个接收到的像素的灰度值来填充由该像素及其下面、右面和右下像素所形成的矩形区域,具体过程参见文[5]。

3.3 JPEG-2000 中的可分级编码分析

3.3.1 JPEG-2000 的目标及核心技术

JPEG-2000 的目标是要发展成为一个适用于具有不同特性的各类静态图像的编码标准,比如黑白图像、灰度图像、彩色图像、多分量图像以及超分量图像等,它们可以是自然图像、文本图像、计算机生成图像,也可以是医学图像、遥感图像和合成图像。同时,该标准将在一个统一的和集成的系统内支持不同的解码模式,像客户/服务器模式、适时传输模式、有限存储器和带宽模式等等,在低比特率领域应用中的编码效果和视觉效果均优于已有的标准。具体目标包括:较已有标准具有更低的比特率;支持连续色调和黑白图像编码;支持无损和有损压缩;支持像素精度级的质量和分辨率的渐进传输;固定大小的存储空间;对码流的随机访问和处理;位错误的鲁棒性;开放式的结构;实时编码能力;向下兼容;基于内容的描述;图像的安全性保护;邻信道空间信息透明性等。

与 JPEG 不同,JPEG-2000 放弃了以 DCT 为主的区块编码方式,采用了以小波变换为主的分块处理方式,其核心技术为 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimized Truncation)算法^[9],其基本思想是把每一个子带的小波变换系数分成独立编码的码块(code-block),并且对所有的码块使用完全相同的编码算法。对每个码块进行编码时,编码器不用其他码块的任何信息,只用码块自身的信息产生单独的嵌入码流,每一码块的嵌入码流可以被截断成长度不等的码流,生成不同的位速率。该算法提供了一种具有对嵌入式码流进行优化截取机制的嵌入式分块编码方法,具有灵活的可分级性、可在一定程度上对码流进行随机访问以及较低的复杂度等优异性质。

3.3.2 JPEG-2000 中基于层次码流格式的可分级编码

JPEG2000 采用了基于层(Layer)的码流格式^[2,10]。为了更好地表达分层的思想,JPEG2000 又引入了包(Packets)的概念。一个层则是一个瓦片的包的集合,而包是构建码流的基本单位,它包含了来自对瓦片分量(tile-component)中某一分辨率下空间连续区域在所有子带中对应块的编码所获得的压缩字节。一个包提供了对瓦片分量的某一分辨率下空间连续区域的质量的增加。包的组织可以有若干种排列顺序,从而使得基于层码流格式可以提供四维的可分级编码机制,即质量(数率)可分级、空间分辨率可分级、空间定位(Spatial Location)可分级和分量(Component)可分级。

JPEG2000 的第一维可分级是质量可分级,其可分级的效果非常明显。一幅图像在仅仅接受到其 0.05bpp 的数据后便可被辨认出来,此时对于一个 320×240 大小的图像,只需接收到 480 个字节的数据。当接收到 0.25bpp(2400 字节)的信息量时,最主要的压缩噪音变换消失。为了达到没有可视噪音的效果,通常需要 0.75~1.0bpp 的信息量。

JPEG2000 的第二维可分级是空间分辨率可分级。在这类可分级编码中,最初接收到的很少的一些字节通常用来形成图像的一个小的“缩略图”。随着接收字节的增加,图像的空间分辨率每边成倍增加,直到获得整个图像。

JPEG2000 所提供的第三个可分级是空间定位可分级,在该类可分级中,图像是以自顶向下、逐条或扫描的方式被接收,它对于一些低内存的打印机和扫描仪特别有用。

JPEG2000 的另一维可分级是分量可分级。JPEG2000

支持的图像最多可达到 16384 个分量,比如含有一个分量的图像有灰度图像,含有 3 个分量的图像有 RGB 图像、YUV 图像等,而含有 4 个分量的图像有 CMYK 图像。分量可分级将控制对应不同分量数据解码的顺序。在分量可分级解码中,一个图像的灰度级版本首先被解码,然后是颜色信息,之后是覆盖的注释和文本等。

JPEG2000 所提供的四维可分级编码机制可以通过基于层次的码流中包的数据扫描顺序(称为累进顺序)来实现,共包括以下五种累进顺序:Layer-resolution-component-position、Resolution-layer-component-position、Resolution-position-component-layer、Position-component-resolution-layer 和 Component-position-resolution-layer。各个累进顺序的具体格式参见文[2]。

3.3.3 JPEG-2000 中 ROI 可分级编码

JPEG-2000 中提出了基于 ROI 的编码机制,这在一定程度上体现了 JPEG-2000 所具有的基于内容的编码能力。此外,标准中还提出了一种 Maxshift 的 ROI 编码方法^[3,12],其基本思想为:将与重构 ROI 无关的变换系数(不妨称为背景系数)适当按比例缩小,使得与 ROI 相关连的系数(不妨称为 ROI 系数)在进行编码时排在背景系数的前面,这样在解码端,在一定的解码率下 ROI 系数能得到充分的解码。

Maxshift 方法的编码过程如下:

(1) 确定 ROI 面罩(即对最后重构 ROI 有贡献的所有小波分解系数的集合)。

首先利用 ROI 的形状信息(比如二值 α 平面)确定属于 ROI 的像素;根据所采用的小波变换的逆变换确定重构当前层 ROI 系数所需要的上一层系数。此过程重复进行,直至找到所有的 ROI 系数。图 7 和图 8 分别给出了 $W9 \times 7$ 滤波器和 $W5 \times 3$ 滤波器逆变换的示意图。在 $9/7$ 小波变换中,为了重构 ROI 中的 $X(2n)$ 和 $X(2n+1)$,则需要其上一层低频子带中的系数 $L(n-1)$ 、 $L(n)$ 、 $L(n+1)$ 、 $L(n+2)$ 和高频子带中的 $H(n-2)$ 、 $H(n-1)$ 、 $H(n)$ 、 $H(n+1)$ 、 $H(n+2)$ 。 $5/3$ 小波变换的情况与其相类似。

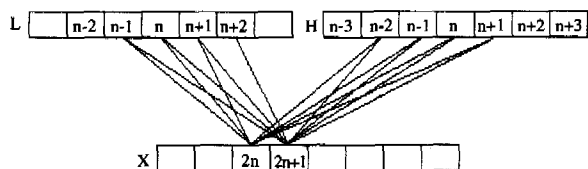


图 7 $9/7$ 小波逆变换示意图

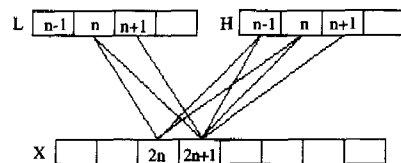


图 8 $5/3$ 小波逆变换示意图

(2) 确定背景系数的缩小因子。

首先求出所有码块中背景系数的最大值,然后据此求出背景系数的缩小因子,使得背景系数被缩小后其最大值要比 ROI 系数中非零最小值还要小。

(3) 根据 ROI 面罩和背景系数的缩小因子对背景系数进行缩小操作(参见图 9)。

(4) 将背景系数缩放因子写入码流相应的标志位中。

Maxshift 方法的解码过程变得非常简单,首先从码流相应的标志位中获取缩小因子并利用此缩小因子确定出一个阈值,该阈值介于 ROI 系数与背景系数之间(具体参见文[2] Annex H),然后将码流中相应的每一个系数与阈值相比较。如果比阈值小,则按缩小因子对其进行等比例放大。

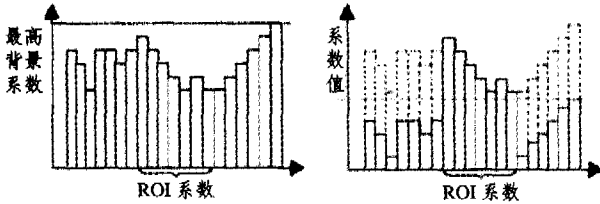


图9 对背景系数实施缩小操作前后情况示意图

Maxshift 编码方法具有许多好的性质。首先,它支持任意形状的 ROI 编码,并且具有较小的复杂度;第二,它无需向解码端发送 ROI 的形状信息和 ROI 面罩信息,并且在解码端也无需对 ROI 进行特殊考虑;此外,该方法还具有支持对 ROI 的质量和分辨率的可分级解码等特性。

3.4 MPEG-4 VTC 中的图像可分级编码分析

MPEG4 中对静态图像纹理给出了一种基于零树小波^[13]的空间与数率混合可分级的编码方案^[14,4],整个方案首先对纹理图像进行小波分解(MPEG-4 提供了一种省缺的 9/3 奇次对称双正交小波)。对于低频子带,方案进行了单独处理,即首先采用一种“均匀中点提升”量化器对小波系数进行量化,然后采用 DPCM 编码模式和自适应算术编码器对量化后的数据进行编码;对其它高频子带,则采用了基于零树的多尺度编码方法^[7]。具体过程参见图 10。

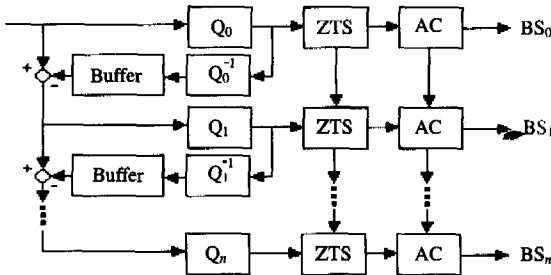


图10 MPEG-4 中静态图像纹理多尺度零树小波编码流程图

方案中对于第一层的各高频子带首先用量化器 Q_0 进行量化,然后采用零树编码方法对其进行扫描并进行熵编码,同时将其输出 BS_0 作为码流的第一部分;被量化的第一层的各高频子带也被重构并与原图像的小波分解系数相减,并将结果作为第二阶段的编码源数据,采用与第一阶段相类似的编码过程可以获得码流的第二部分 BS_1 ;上述过程一直进行下去,直到所有的高频子带层次均被处理完,此时所获得的码流即具有空间与数率混合可分级特性。

方案中的量化器采用了多层量化模式。量化的层次在编码器中被定义并在码流中被说明,所有的量化器均为具有二倍于量化步长“死区”的“均匀中点提升”量化器。方案中的熵编码采用了一种自适应的算术编码方法。算法的具体实现过程和码流的定义格式可参看文[14]。

3.5 比较与讨论

针对本文所提到的几个主要的图像编码标准,表 1 对其主要性能^[15]进行了比较,其中“+”号表示支持该项功能,

“—”号表示不支持。“+”号越多,表示所支持的程度越好。

表1 各种图像标准的性能比较

功能	JPEG2000	JPEG-LS	JPEG	MPEG4-VIC	PNG
无损压缩性能	+++	++++	+	—	+++
有损压缩性能	+++++	+	+++	++++	—
可分级码流	+++++	—	++	+++	+
ROI 编码	+++	—	—	+	—
随机访问	++	—	—	—	—
低复杂性	++	+++++	+++++	+	+++
错误恢复	+++	++	++	+++	+
非迭代码率控制	+++	—	—	+	—
对不同类型图像的压缩	+++	+++	++	++	+++

从表 1 可以看出,JPEG2000 和 MPEG4-VTC 都具有很强的可分级特性。但 JPEG2000 所提供的更多的选项,使得所生成的渐进式码流更加灵活有效,它所具有 ROI 可分级编码特性,允许图像的某一部分可以较背景以更好的质量被解码,这在一定程度上体现了基于内容的编码能力。JPEG 和 PNG 也在一定程度上表现出了可分级特性。

4 图像编码技术展望

尽管目前已经提出许多图像压缩的国际标准,同时提出了许多有效的图像编码算法^[12]。但随着 Internet 特别是无线通讯应用领域的不断发展,对静态图像编码的要求除了继续追求较高的压缩比和压缩效果之外,还将提出更高的要求。我们认为未来几年图像编码技术在以下几个方面将会有更好的发展:

(1) 图像的可分级编码技术作为适应多分辨率环境下多媒体应用的重要方案将随着编码工具的不断发展和完善而更加灵活和有效,特别是适应无线信道的图像可分级编码技术,将具有非常好的应用前景;

(2) 对多种类型图像环境下的图像编码能力将得到进一步加强,特别是对自然图像与计算机生成图像的混合环境下的图像编码技术,将成为一个重要的研究方向;

(3) 具有可对编码码流进行直接操作和访问的图像编码技术将成为一个重要的目标。目前,在所介绍的图像标准中,JPEG2000 提供了一些直接对码流进行简单操作的功能,比如对图像进行 90 度、180 度和 270 度的旋转以及垂直和水平翻转等,但更加复杂的操作还有待进一步研究;

(4) 基于对象的图像编码技术将会受到进一步的重视。目前,在所介绍的图像压缩标准中,只是 MPEG4-VTC 和 JPEG2000 初步体现了基于对象的图像编码特性,而进一步的研究还有待加强。

此外,多种数学工具的有机结合将会提高图像的压缩效率,这也是未来的一个研究方向。

参考文献

- 1 Pennebaker W B, Mitchell J L. JPEG Still Image Data Compression Standard. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
- 2 ISO/IEC JTC1/SC29/WG 1,ISO/IEC FCD 15444-1, Information technology JPEG 2000 image coding system: Core coding system [WG 1 N 1646R], march 2000. <http://www.jpeg.org/>

- FCD15444-1. htm
- 3 王相海. 基于小波的图像和视频可分级编码研究: [南京大学博士后研究报告]. 2001
 - 4 王相海. 基于小波的图像可分级编码研究. 小型微型计算机系统, 2003, 24(9): 1677~1681
 - 5 W3C. Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition) Information technology - Computer graphics and image processing - Portable Network Graphics (PNG): Functional specification. ISO/IEC 15948:2003 (E). W3C Recommendation 10 November 2003. <http://www.w3.org/TR/2003/REC-PNG-20031110>
 - 6 ISO/IEC, ISO/IEC 14495-1:1999; Information technology - Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images: Baseline, December 1999
 - 7 ISO/IEC, ISO/IEC 14496-2:1999; Information technology - Coding of audio-visual objects - Part 2: Visual, December, 1999
 - 8 PNG. <http://zh.wikipedia.org/wiki/PNG>
 - 9 Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT. IEEE Trans Image Proc, 2000, 9(7): 1158~1170
 - 10 刘方敏, 吴永辉, 于建新. JPEG2000 图像压缩过程及原理概述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(10): 905~912
 - 11 Marcellin M W, Bilgin A. JPEG2000: Highly Scalable Image Compression. In: Proceedings of 2001 International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC2001), Las Vegas, Nevada, 2001. 268~272
 - 12 王相海, 张福炎. 静态图像编码研究进展. 计算机研究与发展, 2001, 38(11): 1315~1326
 - 13 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445~3462
 - 14 Fukunaga S, et al. MPEG-4 video verification model version 16.0. WSO/IEC document JTC1/SC29/WG11 N3312, March 2000/ Noordwijkerhout
 - 15 Santa-Cruz D, Ebrahimi T. An analytical study of JPEG 2000. In: Proc. of the Intl. Conf. on Image Processing (ICIP), Vancouver, Canada, Sept. 2000. 10~13

(上接第 251 页)

表 4 查准率、查全率及 BP 网络训练时间对比 (训练精度为 $MSE=3.0 \times 10^{-6}$)

		平均查准率 (precision)	平均查全率 (recall)	平均训练时间 (秒)
一般方法	不分类的情形	27.4%	100%	25.146
	分类的情形	30.2%	100%	8.688
二步检查法	不分类的情形	50%	100%	75.438
	分类的情形	75%	100%	26.064

结论 本文给出了一种在异构数据环境下进行属性匹配的方法, 该方法能够提高异构数据库间属性匹配的准确率, 明显高于文[4, 5, 9]中属性匹配的查准率和查全率, 减少了人为判断的负担。相信随着属性的增多, 查准率会进一步得到提高。基于 BP 神经网络的二步检查法属性匹配算法有如下优点:

①属性根据数据类型分类后, 描述属性的数据指标趋于一致, 向量的维度减少, 这样进行神经网络训练和匹配将花费更少的时间, 特别是在进行大型数据库集成时是有积极意义的;

②属性根据数据类型分类后, 由于相同属性的确定是在相同(似)的数据类型描述的属性内部进行, 所以整个属性匹配过程可以在不相同(似)的数据类型之间进行并行计算, 能够明显地提高系统效率;

③属性根据数据类型归类后, 可以消除不同数据类型描述的属性之间的匹配干扰, 提高属性匹配结果的准确率;

④二步检查法通过多次训练神经网络, 并对每次的匹配结果求交集, 可以去除匹配结果中不相关数据的干扰, 避免了人为对匹配结果的重新评价, 减轻了用户的负担, 大大提高了匹配结果的准确率。

我们下一步的工作是在大型异构数据库环境下进行实验并且解决不相同(似)的数据类型描述的同一属性的匹配问题, 实现异构数据库间属性匹配及集成的高效率。

参 考 文 献

- 1 Hayne S, Ram Su. Multi-user view integration system(MUVIS): An expert system for view integration. In: Proc. in the 6th Intl. Conf. on Data Engineering, 1990. 402~409
- 2 Salton G, Yang C S, Yu C T. A theory of term importance in automatic text analysis. Journal of the American Society for Information Science, 1975, 26(1): 33~44
- 3 Benkley S S, Fandozzi J F, Housman E M, et al. Data element tool-based analysis (DELTA): [Technical Report MTR 95B0000147]. The MITRE Corporation, Bedford, MA, 1995
- 4 Li W-S, Clifton C, Liu S-Y. Database integration using neural networks: implementation and experiences. Knowledge and Information Systems, Springer-Verlag London Ltd, 2000, 2: 73~96
- 5 Li W-S, Clifton C. Semantic integration in heterogeneous databases using neural networks. In: Proc. of the 20th VLDB Conf. Santiago, Chile, 1994
- 6 Premerlani W J, Blaha M R. An approach for reverse engineering of relational databases. Communications of the ACM, 1994, 37(5): 42~49
- 7 Yu C, Sun W, Dao S, Keirsey D. Determine relationships among attributes for interoperability of multi-database systems. In: Proc. of RIDE-IMS. IEEE, March, 1991
- 8 Sheth A, Larson J. Federated database systems for managing distributed heterogeneous, and autonomous databases. Computer Surveys, 1990, 22(3): 183~236
- 9 Li W-S, Clifton C. Using field specifications to determine attribute equivalence in heterogeneous databases. In: Third Intl. Workshop on Research Issues on Data Engineering: Interoperability in Multidatabase Systems, IEEE, Vienna, Austria, 1993. 174~177
- 10 Larson A, Navathe S B, Elmasri R. A theory of attribute equivalence in database with application to schema integration. Trans. on Software Engineering, 1989, 15(4): 449~463
- 11 Sheth A, Larson J, Cornelio A, et al. A tool for integrating conceptual schemas and user views. In: Proc. of the 4th Intl. Conf. on Data Engineering, Los Angeles, CA, IEEE, 1988
- 12 强保华, 吴中福, 陈凌, 吴开贵, 余建桥. 异构数据库环境下语义集成过程的并行计算方法研究. 计算机科学, 2004(9)
- 13 强保华, 吴中福, 余建桥, 陈凌, 吴开贵. 一种基于属性信息熵的实体匹配方法研究. 计算机工程, 已录用