

基于主观试验的自适应视频水印算法

宋星光 张春田 苏育挺

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘要 借助主观试验,给出了一种主观自适应视频水印算法。通过主观试验确定图像中具有不同活动性的像素点水印嵌入强度可觉察门限,得到掩盖函数,并依此控制水印信息的嵌入强度,从而在确保图像具有高质量的同时,充分挖掘视觉潜力,提高水印信息的嵌入强度。实验结果表明,与空域非自适应水印算法和基于简单视觉模型的自适应水印算法相比,基于主观试验的自适应水印算法在保证图像具有高主观质量的同时获得了更高的水印信息检测正确率。

关键词 数字视频水印,主观试验,人眼视觉特性,活动性函数,活动性因子,掩盖函数

中图分类号 TP391

文献标识码 A

Design of Adaptive Watermarking Algorithms for Video Signals Using Subjective Tests

SONG Xing-guang ZHANG Chun-tian SU Yu-ting

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract By introducing the subjective tests, a subjective optimized adaptive video watermarking algorithm was presented. This paper described an adaptive watermarking algorithm which is based on measured visibility thresholds of the impairments brought by watermarking. The visibility thresholds were determined by subjective tests. Constructions of the watermarking scheme were carried out such that the embedding strength is maximized without exceeding the measured visibility thresholds. Experimental results show that the presented watermarking scheme achieves comparatively high detection rate than spatial non-adaptive watermarking scheme and the simple human visual system based adaptive watermarking scheme.

Keywords Digital video watermarking, Subjective tests, Human visual system, Activity function, Activity factor, Masking function

计算机信息化和网络化的飞速发展,使得数字化信息的获取和传输变得越来越容易。人们可借助电子设备将信息传送到世界各地,从而使得电子商务、信息在线等多媒体服务有了广阔的发展前景。近年来,大量数字视频产品的出现,不仅对保护数字视频产品版权的市场需求迫切,也对特殊视频的安全通信提出了要求。

数字视频水印技术作为多媒体水印技术中的一个热点和难点,越来越多的研究开始关注于此。目前的技术多集中在静止图像的水印方法基础上,这主要是有成熟的视觉模型等研究成果的支持。在时间域上,因缺乏精确的视觉模型的建立,研究技术理论比较困难,再加上具体视频压缩编码格式的限制,更容易造成技术应用上的局限性。因此,在研究新的数字视频水印技术时,既要参考图像水印的成熟技术,又应结合视频时间域上的特性,使之适应视频系统的应用特点。

1 空间域视频水印算法

在众多数字视频水印算法中,基于空间域的算法利用图像自身特性直接在空间域完成水印信息嵌入,其硬件实现复杂度较低,同时可以更方便地与现有的视频编解码系统进行

结合。这里以 Hartung^[1]等人提出的空间域扩频水印算法为例介绍空间域水印嵌入过程。首先,由原始水印信息构成双极性序列,利用扩频系数 C_r 对其进行序列扩展;再与密钥控制的伪随机序列进行置乱调制,将调制后的信息组成与视频图像大小相等的水印信息图像,并引入嵌入强度控制因子 $k_{i,j}$ 对信息图像进行幅度调整。水印信息的嵌入采用直接线性叠加调制,嵌入算法将水印信息 $w(i,j)$ 直接逐个像素地嵌入到图像的对应像素 $v(i,j)$ 上,如式(1)所示:

$$\bar{v}(i,j) = v(i,j) + k_{i,j}w(i,j) \quad i,j \in N \quad (1)$$

其中,嵌入强度控制因子 $k_{i,j}$ 的设计要利用人眼的视觉特点和图像自身的统计特性进行自适应调整,从中挖掘出提高嵌入强度和嵌入量的潜力,从而在确保不影响重建图像质量的前提下,增加水印信息检测时的正确率。基于空间域的水印算法中, Hartung 以 Girod^[2,3]提出的视觉模型作为水印调制控制的基础; Zhu Bin^[4]等利用频率敏感特性和基于图像边缘的局部掩盖提出了一种用于图像编码和水印嵌入的模型; Yoshiura^[5]采用自行设计的 VSP 模式 (visual shape preserving method) 来分析计算水印信息的嵌入强度; Kalker^[6]等利用空域掩盖效应 (spatial masking), 采用拉普拉斯滤波器对原图像

到稿日期:2008-09-24 返修日期:2009-01-07 本文受 863 国家重点基金项目(2006AA01Z407)资助。

宋星光(1980—),男,博士研究生,主要研究方向为视频编解码、数字水印, E-mail: sxg@tju.edu.cn; 张春田(1939—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为数据压缩与编码理论、数字视频; 苏育挺(1972—),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理与视频编码、数字水印。

进行滤波得到掩图(masking image),然后乘上一个固定系数 q 对掩图进行幅度调整,用幅度调整后的掩图中像素点的亮度值作为原图中对应像素点的嵌入强度。

虽然各种算法利用的视觉模型不同,但均是在确保水印信息不易觉察的同时增强水印信息的嵌入强度。这里涉及到两个领域的研究:一是人类视觉系统 HVS(Human Visual System)特性的研究,包括生理、心理等不同角度的研究。另一方面,研究能与已知的视觉特性相匹配的水印嵌入模型,充分利用视觉的潜力。但目前使用简单视觉模型时多遇到需经实验确定且因图而异的待定参数,而包括时间掩盖效应等特性在内的更为精确和实用的视觉模型尚处在研究发展中。本文为更充分地利用人眼视觉特性,引入主观试验建立视频水印嵌入模型,在确保重建图像具有高质量的同时(不引入可见噪声),利用数字视频水印的特点,提高水印的嵌入强度,实现了水印不可感知性和鲁棒性之间的适当折衷。

2 主观自适应视频水印算法

图像编码中,主观试验不仅用来最终评价各种编码方案图像的质量优劣,决定可以接受的码率压缩程度,而且已经发展成为最优编码设计中的重要手段^[7,8]。本文在视频水印算法的设计中,借鉴图像编码的研究经验,通过主观试验建立视频水印嵌入模型。设计水印嵌入模型包含如下两个步骤:①利用主观试验方法,测出不同活动性下刚刚不能被觉察的水印嵌入强度的大小,得到“嵌入可觉察门限”函数。②根据所测得的“嵌入可觉察门限”函数控制水印嵌入强度,使可能的最大嵌入强度刚刚处于可觉察门限之下,实现空间域水印信息的嵌入。

2.1 主观试验过程

图像质量的主观评价和许多因素有关,包括评价人员的经验、所选用的图像材料以及观看条件(如室内照明环境、显示器对比度、亮度、观看距离、图像大小)等,这些因素都会不同程度地影响测试结果。因此,精心进行试验设计非常必要,国际无线电咨询委员会 CCIR(consultative committee of international radio)对图像质量的主观评价方法提出建议(CCIR Recommendation 500^[9]),对主观试验的人员、评价等级、测试图像、测试条件、图像显示方式等都做了规定。主观试验测试序列选择 ITU-T 视频质量专家组 VQEG(video quality experts group)提供的 20 个不同场景的标准测试序列^[10],序列图像大小分别为 720×576 和 720×480 ,序列长度为 200 帧。测试条件参照 CCIR 500 建议的测试条件。用 Y 表示原始图像序列,用 W 表示嵌入水印的图像序列,试验过程如下:

(1)做比较试验时,先由大的嵌入强度做起,使观察者很容易区别嵌入水印的图像与原始参考图像。然后再逐步减小嵌入强度,减小水印嵌入所带来的亮度误差,提高嵌入水印图像的质量与嵌入前后图像的分辨难度。

(2)做比较试验时,屏幕分成左右两边,将原图像序列 Y 和水印图像序列 W 调出后同屏显示。显示形式包括 YY (两边都是原图像序列)、 WW (两边都是水印图像序列)、 YW (左边是原图像序列,右边是水印图像序列)和 WY (左边是水印图像序列,右边是原图像序列)4 种。测试时,随机选择一种显示形式,以 25 帧/s 的速度在屏幕上显示,供观察者判断。

然后间隔 5s,观察者在此期间在所发表格中填上所见到的是 YW, WY, YY, WW 中的哪一种形式。

(3)5s 过后,调出下一组测试序列。随机选择一种显示形式,在屏幕上显示。再间隔 5s 填表,如此继续。这样,嵌入强度的数值每变更一次,这种试验则进行一轮。

(4)在屏幕上显示测试序列的同时,由计算机另外存储屏幕上的左右随机显示形式,等到处理试验结果时,作为检查观察者判断正、误的标准。

(5)根据试验结果进行统计处理,得到如图 1 所示的平均错判率 P_G 与嵌入强度间的关系。

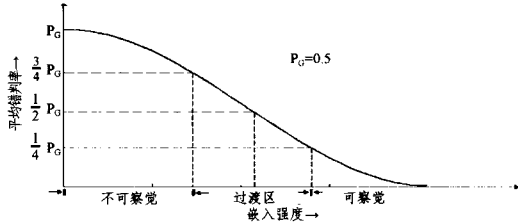


图1 平均错判率与嵌入强度的关系

图1说明,当嵌入强度很大时,嵌入水印的图像有明显的噪声,因此与原图明显可分,平均错判率为 0。如果嵌入强度减小,两种图像的区分将逐渐变得困难,平均错判率也会逐渐上升。当嵌入强度很小时,两者将很难区分,则此时的平均错判率 P_G 应该等于 0.5。这时, P_G 对应的嵌入强度值就是所求的嵌入可觉察门限 T 。理想情况下,平均错误率 P_G 与嵌入强度间应呈阶跃函数关系。但是,由于观察者之间的差别及各次判断的起伏,不容易获得阶跃关系,而是存在一个过渡区。因此,为了提高水印算法的隐蔽性,确保重建图像的主观质量,一般取 P_G 等于 0.75 时对应的嵌入强度值作为“刚刚不能被觉察的嵌入强度”。

2.2 水印嵌入模型的建立

由于存在视觉掩盖效应,对于同样大小的嵌入强度,出现在图像中变化剧烈的局部或其附近(如边缘、纹理处)的嵌入强度就不如出现在内容变化不大的平坦区的那么容易被觉察。或者说,在前一种场合,水印嵌入的可觉察门限较高,不易被人眼觉察。相应地,在这些地方可以适当提高嵌入强度。掩盖效应的强弱取决于嵌入点图像局部细节变化的剧烈程度,即图像局部活动性的大小。活动性越大,掩盖效应越强,嵌入可觉察门限越高。

活动性函数(activity function)可以作为图像局部活动性的表征。活动性函数的定义有多种方法^[11,12],本文中,活动性函数的定义如式(2)所示:

$$A = \max_{i,j \in DN} |s_i - s_j| \quad DN = \{0, 1, \dots, 8\} \quad (2)$$

其中, A 是当前像素点的活动性因子(activity factor), s_i 和 s_j 是当前像素点 s_0 为中心的 3×3 邻域内像素点的亮度值,如图 2 所示。

s_1	s_2	s_3
s_4	s_0	s_5
s_6	s_7	s_8

图2 3×3 邻域

对于给定的活动性函数,用主观试验方法测出人眼在不同活动性下刚刚不能被觉察的嵌入强度的大小,得到“嵌入可

觉察门限”函数。本文从掩盖效应的角度,把所测得的“嵌入可觉察门限”函数称为掩盖函数(masking function):

M=M(A) (3)

实际测量已经证实,掩盖函数是活动性的增函数,即随着活动性增加,可以容忍的嵌入强度增大。掩盖函数的测量并不是通过1次试验得到,而是通过大量的主观比较试验得到。

在测量掩盖函数的时候要选择不同类型的视频序列,其中既包括含有大面积平坦区的视频序列,例如 Canoa, F1 car 等,也包括含有大面积边缘和纹理的视频序列,如 Football, Mobile 等。图 3 是经主观试验测试得到的掩盖函数曲线。

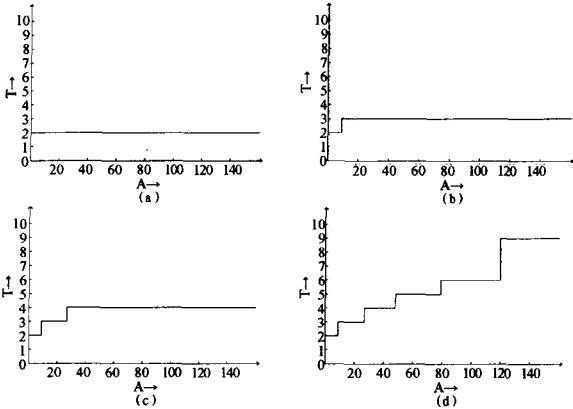


图 3 亮度信号的掩盖函数曲线

掩盖函数主观试验测试过程如下:

(1)对图像中的所有像素点进行相同强度的水印嵌入,通过第 2.1 节所述的主观试验方法,确定嵌入可觉察门限 T_0 ,如图 3(a)所示。

(2)由于掩盖效应,对于活动性大的区域,可以适当提高嵌入强度。因此,主观试验的第二步对于活动性较高的区域,进行同样的主观试验测试过程,确定区域的嵌入可觉察门限,具体过程如下:

① 对于活动性高于 $A_1=3$ 的区域进行主观试验测试,确定区域的嵌入可觉察门限 T_1 。如果 $T_1=T_0$,转②。

② 重复步骤①,直至第 n 步,对于活动性大于 $A_n=3n$ 的区域,经过主观试验测得的区域嵌入可觉察门限 $T_n \neq T_0$ (嵌入可觉察门限 T 最小步长为 1),这时,对应的活动性 A_n 就是第 1 个分区上界,活动性大于 A_n 的区域嵌入可觉察门限等于 T_n ,如图 3(b)所示。

(3)采用与步骤(2)相同的方法确定下一个活动性分区上界和嵌入可觉察门限,如图 3(c)所示。

重复上述测试过程就可获得如图 3(d)所示的嵌入可觉察门限 T 与活动性因子 A 间的关系曲线(掩盖函数),用来设计视频水印算法。由图 3(d)可见,掩盖函数是活动性因子 A 的阶梯函数。掩盖函数划分为 4 个区域,具体的分区和区域嵌入可觉察门限如表 1 所列。

表 1 亮度信号的嵌入可觉察门限和活动性分区

活动性分区	嵌入强度	活动性分区	嵌入强度
0~9	2	48~78	5
9~27	3	78~120	6
27~48	4	120~255	9

由于活动性因子大于 120 的像素点在视频序列所有像素点中所占的比例很小,如表 2 所列,进一步细分对整体嵌入强度的贡献不大,因此对于活动性大于 120 的像素点采用相同

的嵌入强度。

表 2 测试序列中活动性因子大于 120 的像素点所占比例

视频序列	比例 (%)	视频序列	比例 (%)
News	3.6	Football	0.8
Akiyo	0.8	Coastguard	3.1
Foreman	1.5	Container	5.7

2.3 主观自适应视频水印算法的实现

水印信息嵌入过程中,首先由式(2)计算当前像素点的活动性因子,然后根据主观试验测量得到的掩盖函数得到当前像素点的嵌入可觉察门限,并依此确定嵌入强度控制因子 $k_{i,j}$,如式(4)所示:

$k_{i,j}=M(A_{i,j}) \quad i,j \in N$ (4)

式中, $A_{i,j}$ 是当前像素点的活动性因子。

水印信息的提取和检测采用相关统计检测。利用水印信息构造上的相关特性,运用提取水印信息统计上的稳定性来传递信息。提取算法首先对解码重建的图像序列进行滤波处理,得到一个经高通滤波的视频信息 $\bar{V}$,实现水印信息的预提取。然后,利用与水印嵌入过程中相同的密钥控制的伪随机调制序列 P 与预先提取的水印信息进行相关统计检测,如式(5)所示:

$s_j = \sum_{i=0}^{Cr-1} p_i \bar{v}_i$ (5)

其中, S_j 是相关检测值, Cr 是扩频系数。 S_j 的符号函数值 $\text{Sign}(S_j)$ 等于嵌入的水印信息值。

3 实验结果与分析

为了检测主观自适应水印算法的性能,将本文方法与固定嵌入强度算法(取式(1)中嵌入强度控制因子 $k_{i,j}$ 为常数 p)以及基于简单视觉模型的空间域自适应算法进行比较。为了方便比较,在空间域自适应算法中,选择具有代表性的 Kalker^[6]算法进行比较。首先,采用第 2 节中所述的基于主观试验的方法确定采用各个测试序列(实验部分选择了 4 个不同类型的视频序列)进行实验时固定嵌入强度法的嵌入强度 p 以及 Kalker 算法中的固定系数 q ,以确保对于各个测试序列在采用以上两种算法嵌入水印信息后的图像与采用本文方法嵌入水印信息后的图像都具有相同的主观质量。对于各个测试序列,固定嵌入强度法的嵌入强度 p 和 Kalker 算法的固定系数 q 如表 3 所列。

表 3 不同测试序列的嵌入强度参数

视频序列	Paris	Coastguard	Foreman	Container
p	2	3	2	2.5
q	0.01	0.015	0.01	0.015

在确定了固定嵌入强度 p 和固定系数 q 后,比较 3 种水印算法在不同噪声干扰和攻击下的水印信息检测错误率。3 种水印嵌入算法水印信息嵌入前后图像的主观质量比较如图 4 所示。由图 4 可见,根据本文方法得到的水印图像与固定嵌入强度法以及 Kalker 算法的水印图像在主观视觉上无明显差异。

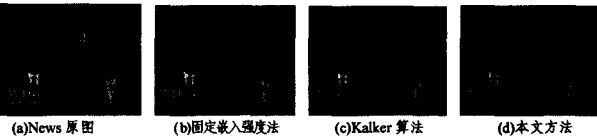


图 4 嵌入水印信息前后图像主观质量比较

为了检测各种方法的鲁棒性,统计了标准测试序列在不

同视频码率约束条件下水印信息检测的错误数量。以 TM5 为标准 MPEG2 压缩编解码实验系统,测试序列选择 Foreman, Paris, Coastguard 和 Container, CIF 格式(352×288), 长度为 200 帧。视频水印嵌入选择 Hartung 等人的空间域扩频水印算法,其中扩频系数 $Cr=704$,每帧图像嵌入 144bit 信息,检测水印信息总量为 28800bit,测试结果如表 4 所列。

表 4 亮度信号的嵌入可觉察门限和活动性分区

水印算法	视频序列	码率 (Mb/s)				
		2	3	4	5	6
固定强度法	Paris	1403	648	455	415	397
	Coastguard	1279	330	87	36	17
	Foreman	713	148	48	21	17
	Container	90	47	34	26	25
Kalker 算法	Paris	547	176	116	107	98
	Coastguard	812	173	30	12	8
	Foreman	280	47	9	7	6
	Container	10	6	1	1	1
本文方法	Paris	15	3	3	3	3
	Coastguard	368	23	8	5	5
	Foreman	67	6	0	0	0
	Container	0	0	0	0	0

从测试结果可以看出,水印信息检测错误数量与 3 个方面的因素有关:约束码率、视频序列自身特性和水印算法。随着约束码率的降低,水印信息检测错误数量明显增加;从不同的序列来看,Coastguard 序列水印信息检测错误数量高于 Paris 序列,这是因为 Coastguard 序列中包含较多的运动对象,帧间预测差值信号能量较大,在恒定约束码率情况下,压缩编码对水印信息造成的影响较大。另一方面,Foreman 序列水印信息检测错误数量高于 Container 序列,是由于 Foreman 序列中背景多为平坦区域,水印信息嵌入强度较小,造成压缩解码重建后检测错误的增加。从水印算法来看,表 4 结果表明,在相同的码率条件下,基于主观试验的自适应视频水印算法具有更高的检测正确率。

为了更直观地检测 3 种水印算法的鲁棒性,比较了它们在不同噪声干扰和攻击下水印信息的检测正确率。对嵌入水印图的视频序列分别进行 MPEG2-AVS 转码、中值滤波和通用水印测试软件 Stirmark^[13,14] 噪声加扰(噪声级别 20)。图 5 为 Foreman 序列第 20 帧图像受到转码、滤波和加扰后的示意图。由图 5 可见,图像的主观质量在受到攻击后有了明显的下降,尤其是经中值滤波和噪声加扰后的图 5(c)和图 5(d)。图 6 是从经过上述处理后的视频序列中提取出的水印图,其中,最上面一行是经 MPEG-2-AVS 转码后从序列中提取出的水印图,转码码率 3Mb/s;中间和下面两行分别是经中值滤波和噪声加扰后提取的水印图。为了定量描述提取出的水印图与原图的相关性,计算两者的相关系数 r ,如图 6 所示。采用本文方法嵌入水印信息的视频序列,经过转码、中值滤波和噪声加扰后提取的水印图与原图的相关系数高于 Kalker 算法和固定嵌入强度法。因此,本文方法具有更高的检测正确率。

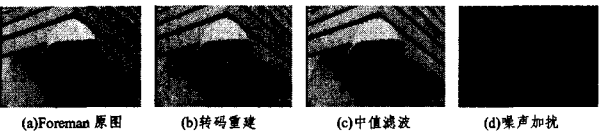


图 5 Foreman 序列第 20 帧图像进行转码、滤波和加扰后的示意图

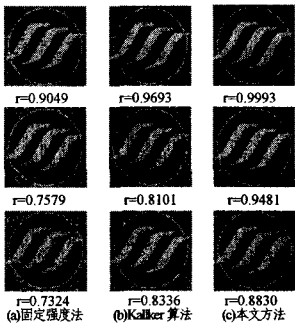


图 6 提取出的水印图及其与原图的相关系数

结束语 本文将主观试验引入到自适应视频水印算法的设计中,利用主观试验方法确定水印嵌入强度可觉察门限,得到“嵌入可觉察门限”函数,即掩盖函数。根据掩盖函数控制水印嵌入强度,实现空间域水印信息的自适应嵌入。在确保重建图像具有高质量的同时,充分挖掘视觉潜力,提高水印的嵌入强度。实验结果表明,与空域非自适应水印算法和基于简单视觉模型的自适应水印算法相比,本文算法在相同主观质量的条件下具有更高的检测正确率。并且,对于各种类别的视频序列可以直接依据本文的实验结果确定嵌入强度,不需要提前进行视觉测试。而固定嵌入强度法以及其它一些空域自适应水印算法在面对不同视频序列时,需要重新进行视觉测试以确定相应的嵌入强度控制参数。因此,本文算法具有很好的实际应用价值。

参考文献

- [1] Hartung F, Girod B. Watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 283-301
- [2] Girod B. Psychovisual aspects of image communication[J]. Signal Processing, 1992, 28: 239-251
- [3] Girod B. The information theoretical significance of spatial and temporal masking in video signals[C]// Proceedings of SPIE, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display. 1989, 1077: 178-187
- [4] Zhu Bin, Swanson M D, Tewfik A H. Robust data hiding for images[C]// IEEE Digital Processing Workshop. 1996: 37-40
- [5] Yoshiura H, Echizen I, Arai T, et al. VSP: A digital watermark method for motion picture copyright protection[C]// International Conference on Consumer Electronics. Beijing, China, 1998: 338-339
- [6] Kalker T, Depovere G, Haitsma J, et al. Video watermarking system for broadcast monitoring[C]// IS&T/SPIE Conference on Security and Watermarking of Multimedia Contents. San Jose, California, USA, 1999: 103-112
- [7] 张春田. 电视图像编码与主观试验[J]. 电视技术, 1985, 38(2): 33-38
- [8] Pirsch P. Design of DPCM quantizers for video signals using subjective tests[J]. IEEE Transaction on Communication, 1981, 29(7): 990-1000
- [9] CCIR Recommendation 500. Method for the subjective assessment of the quality of television pictures[R]. CCIR 13th Plenary Assembly, Geneva, Switzerland, 1974
- [10] [DB/OL]ftp://ftp.crc.ca/crc/vqeg/TestSequences/

- [11] Maes M, Kalker T, Linnartz J-P M G, et al. Digital watermarking for DVD video copy protection [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(9): 47-57
- [12] Kutter M, Winkler S. A vision-based masking model for spread-spectrum image watermarking[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 11(1): 16-25
- [13] Petitcolas F A P, Anderson R J, Kuhn M G. Attacks on copy-

right marking systems[C]// Aucsmith D, ed. Information Hiding, Second International Workshop, IH'98. LNCS 1525. Portland, Oregon, USA, Springer-Verlag, April 1998: 219-239

- [14] Petitcolas F A P. Watermarking schemes evaluation [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(5): 58-64

(上接第 263 页)

所有的相关证据都有且仅有一个共同相关源证据 E_k , 这是最简单的一种情况。

最复杂的一种情况是这些相关证据两两之间都有一个不同的相关源证据, 如果这样, 那么这 n 个相关证据就有 $\frac{1}{2}n(n-1)$ 个相关源证据, 当 n 较大时, 求合成证据的过程将变得非常繁琐。

结束语 DS_m 理论是一个新兴的信息融合理论, 它是 D-S 证据理论的自然扩展, 比 D-S 证据理论具有更强的表达能力, 能有效地处理矛盾和不精确信息。但是由于它才刚刚产生, 还未引起足够的重视, 虽然已经有了一些应用, 但还需要更多的实际应用来证明它的价值和推动它的发展。

D-S 证据理论只适用于证据独立的情况, 对此文献[10]给出了一个 D-S 证据理论框架中相关证据的合成方法。而 DS_m 这个新的理论同样也不适用于证据独立的情况, 因此本文提出了相应的在 DS_m 理论框架中相关证据的模型, 用来解决 DS_m 理论相关证据的合成问题。从某种意义上说, 本文提出的模型是自由 DS_m 模型的一个扩展, 它可以表示自由 DS_m 模型相关证据的合成, 比自由 DS_m 模型更具一般性。相比于文献[10]中 D-S 证据理论相关证据模型下得到的定理 2, 本模型下得到的定理 3 条件更宽松, 更有实用价值。此外, 本文探讨了在不满足定理 3 的情况下用改进后的 PSO 算法求解正交差, 扩大了本文 DS_m 理论相关证据模型的适用范围。

本文提出了 DS_m 理论相关证据模型, 但并没有彻底解决问题。在实际应用中, 该模型中的相关源证据 m_k 可能是不好确定的, 还需要进一步研究。文献[10]中的 D-S 相关证据合成方法也有这样的问题, 文献[15]则针对一个具体的情况对文献[10]中提出的方法给出了解决方案。

参 考 文 献

- [1] Smarandache F, Dezert J. An introduction to the theory of plausible and paradoxical reasoning[C]// International Conference on Numerical methods and Applications. Springer Verlag, Borovetz, Bulgaria, 2002
- [2] Tchamova A, Semerdjiev T, Dezert J. Estimation of target behavior tendencies using Dezert-Smarandache theory[C]// The 6th International Conference on Information Fusion. Radisson

Hotel, Cairns, Queensland, Australia, 2003

- [3] Tchamova A, Dezert J, Semerdjiev T, et al. Target tracking with generalized data association based on the general DS_m rule of combination[C]// The 7th International Conference on Information Fusion. Stockholm, Sweden, 2004: 392-399
- [4] Tchamova A, Dezert J, Semerdjiev T, et al. Multi-target tracking applications of Dezert-Smarandache theory[M]. Albena, Bulgaria; NATO Advanced Study Institute, 2005
- [5] Singh R, Vatsa M, Noore A. Integrated Multilevel Image Fusion and Match Score Fusion of Visible and Infrared Face Images for Robust Face Recognition[J]. Pattern Recognition-Special Issue on Multimodal Biometrics, 2008, 3(41): 880-893
- [6] Vatsa M, Singh R. Quality - Augmented Fusion of Level - 2 and Level-3 Fingerprint Information using DS_m Theory[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2007
- [7] Corgne S, Hubert-Moy L, Dezert J, et al. Land cover change prediction with a new theory of plausible and paradoxical reasoning [C]// The 6th International Conference on Information Fusion. Radisson Hotel, Cairns, Queensland, Australia, 2003
- [8] Dezert J. Foundations for a new theory of plausible and paradoxical reasoning[J]. Information and Security Journal, An International Journal, 2002, 9: 90-95
- [9] Smarandache F, Dezert J. Advances and applications of DS_mT for information fusion[M]. Rehoboth; America Reserch Press, 2004
- [10] 孙怀江, 杨静宇. 一种相关证据合成方法[J]. 计算机学报, 1999, 22(9): 1004-1007
- [11] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版, 1993
- [12] Zadeh L A. On the validity of Dempster's rule of combination of evidence. ERL Memo M79/24, University of California, Berkeley, 1979
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia; IEEE Press, 1995
- [14] Dezert J, Smarandache F. On the generation of hyper-power sets [C]// Proc. of Fusion 2003. Cairns, Australia, July 2003
- [15] 孙怀江, 胡钟山, 杨静宇. 基于证据理论的多分类器融合方法研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(3): 231-235