

基于自适应阈值 Kirsch-LBP 纹理特征的均值 漂移目标跟踪算法

唐继勇¹ 仲元昌² 张校臣² 赵国龙²

(重庆电子工程职业学院计算机学院 重庆 401331)¹ (重庆大学通信工程学院 重庆 400044)²

摘要 针对以颜色特征建立概率模型的 Mean Shift 目标跟踪算法在光线变化时存在的缺陷,提出了一种融合改进型纹理特征与 HSV 颜色特征的 Mean Shift 目标跟踪算法。首先,设计一种具有抗光性能的自适应阈值 Kirsch-LBP 纹理特征算子,该算子利用 Kirsch 算子的 8 个方向模板所求的差值,并采用 LBP 模板均值作为自适应阈值,再按照旋转不变 LBP 原理提取局部纹理特征;其次,利用不同特征相似性系数间的关系作为加权准则来构建新的权重;最后,将其嵌入到 Mean Shift 算法中以实现目标跟踪。对比实验结果表明,本算法在光线变化场景中也具有良好的目标跟踪特性,广泛适用于光照变化和姿态变化等复杂场景下的目标跟踪领域。

关键词 均值漂移,目标跟踪,纹理特征,颜色特征,加权融合

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.064

Mean Shift Object Tracking Algorithm of Adaptive Threshold Kirsch-LBP Texture Features

TANG Ji-yong¹ ZHONG Yuan-chang² ZHANG Xiao-chen² ZHAO Guo-long²

(College of Computer, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)¹

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)²

Abstract For improving the performance of the mean shift tracking algorithm based on single color feature, which is adopted to establish the target model when the light changes, a new mean shift object tracking algorithm combining a Kirsch-LBP texture feature with HSV color feature was presented. Firstly, the paper presented a novel adaptive threshold Kirsch-LBP feature description operator with light resistance, which uses eight direction difference of the Kirsch operator, uses the LBP template average as an adaptive threshold, and then according to the rotation invariant principle of LBP extracts local texture feature. Secondly, it used the relationship between similarity coefficient of different features as the weighted criteria to construct the new weight. Finally, it was embedded into the mean shift algorithm to realize target tracking. Experimental results show that the algorithm can improve the accuracy of target tracking effectively in the scene of light changing, and improves the performance of traditional mean shift object tracking algorithm.

Keywords Mean shift, Target tracking, Texture feature, Color feature, Weight fusion

1 引言

均值漂移(Mean Shift, MS)^[1]是一种非参数化概率密度估计方法,已被广泛应用于目标跟踪^[2,3],最具代表性的是由Comaniciu D等^[4,5]提出的经典MS目标跟踪方法,其目标模型仅仅采用RGB颜色核函数直方图,该特征具有对目标形变、旋转不敏感等优点。因此,在简单场景中MS跟踪能够获得较佳的跟踪效果,但RGB颜色特征易受到光照变化的影响导致跟踪产生巨大偏差,甚至丢失目标^[6]。

在目标跟踪中,选用何种目标特征建立概率模型是影响目标跟踪算法准确度的重要因素之一^[7],其中,许多学者均认为颜色特征和纹理特征融合构成的新目标特征能够提高跟踪准确度^[8]。Boussetouane F等^[9]提出纹理与颜色多特征融合

均值漂移,其纹理特征是在灰度共生矩阵中获得的Haralick纹理特征,使得目标跟踪算法计算复杂性增加;文献[10]提出了颜色与LBP纹理相结合的Mean Shift目标跟踪算法,该算法能够有效解决单一颜色特征导致跟踪准确度不高的问题,但LBP纹理特征不能够有效提取较深层次的纹理特征,也不能很好地保留边缘信息^[11]。Kirsch算子是一种具有方向性的边缘检测算子,在提取边缘的同时也得到了边缘的方向^[12]。因此,为了更好地利用LBP纹理特征所表现出的优势,本文首先提出一种具有更强抗光性能的自适应阈值Kirsch-LBP纹理特征。其基本思想是:将Kirsch算子的8个方向模板引入到LBP算子原理中提取Kirsch-LBP纹理特征,该方法计算出Kirsch算子8个方向的边缘响应,并按照旋转不变LBP纹理算子原理计算出一个8位二进制数,再转换成

到稿日期:2014-12-06 返修日期:2015-03-13 本文受科技部科技创新基金项目(10C26215113031),重庆市科技攻关项目(cstc2012gg-yyjs40010)资助。

唐继勇(1971—),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机网络、信息处理、信息安全等;仲元昌(1968—),男,博士,教授,研究生导师,主要研究方向为无线传感器网络、智能信息处理,E-mail:zyc@cqu.edu.cn;张校臣(1988—),男,硕士生,主要研究方向为通信与测控系统、多目标跟踪;赵国龙(1988—),男,硕士生,主要研究方向为通信与测控系统、多目标跟踪。

十进制以获得 Kirsch-LBP 纹理特征值,其中阈值采用模板均值,以起到滤波的作用。

在场景中存在光照变化时,为了更加有效地提高目标跟踪准确度,本文首先以新提出的 Kirsch-LBP 纹理特征为基础,采用不同特征相似度系数间的关系,再融合受光照影响较小的 HSV 颜色特征,最终建立特征权值;然后,将其嵌入到 MS 目标跟踪算法中以实现目标跟踪;最后,进行跟踪实验的对比分析。实验表明,本文算法能够充分利用纹理特征与颜色特征的优势,使得目标跟踪算法获得更好的跟踪性能。

2 纹理-颜色融合的 Mean Shift 目标跟踪

2.1 颜色核函数直方图特征

考虑到 HSV 颜色空间受光照影响较小,本文将 RGB 颜色空间转变成 HSV 颜色空间,在此空间上建立核函数概率密度。

设所感兴趣区域共有 n 个像素,即:

$$\{X_i\}, i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中, $\{X_i\}$ 表示目标区域位置向量。

用 X_0 表示跟踪框中心位置坐标值,并将其 HSV 颜色特征量化为 u 等级,则对于 X_0 的目标颜色模型特征的核函数概率密度估计为:

$$q_u = C \sum_{i=1}^n k \left(\left\| \frac{X_i - X_0}{h} \right\|^2 \right) \delta(b(X_i) - u) \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k \left(\left\| \frac{X_i - X_0}{h} \right\|^2 \right)} \quad (3)$$

$$K(r) = k(\|r\|^2) = \begin{cases} 1 - \|r\|^2, & \|r\| < 1 \\ 0, & \|r\| \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, C 是归一化系数; r 表示离感兴趣区域中心点位置坐标的距离; δ 为 Kronecker delta 函数,用来判断像素点 x_i 的像素值是否等于量化后特征值 u 中的某一值,即 $\delta = \begin{cases} 1, & b(x_i) = u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$; h 是跟踪窗口带宽; $K(\cdot)$ 为 Epanechnikov 核函数^[13],且是一个凸单调递减函数,其目的是使目标区域中不同位置得到不同权值,与离中心点的距离成反比。

2.2 自适应阈值 Kirsch-LBP 纹理特征

考虑到 LBP 纹理特征不能够有效提取较深层次的纹理特征,也不能很好地保留边缘信息^[11],为了更好地在目标跟踪过程中呈现目标特征,同时考虑到 Kirsch 是一种带有方向性的边缘检测算子。本文将其 8 个方向的边缘强度响应值与模板均值按照 LBP 算子原理获得一种更具有抗光性能的自适应阈值 Kirsch-LBP 纹理特征算子。Kirsch 算子的 8 个方向 M_j ($j=1,2,\dots,8$) 示意图如图 1 所示。

5	5	5	-3	5	5	-3	-3	5	-3	-3	-3
-3	0	-3	-3	0	5	-3	0	5	-3	0	5
-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	5	-3	5	5
-3	-3	-3	-3	-3	-3	5	-3	-3	5	5	-3
-3	0	-3	5	0	-3	5	0	-3	5	0	-3
5	5	5	5	5	-3	5	-3	-3	-3	-3	-3

(从左到右、从上到下依次为 $[0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ]$)

图 1 Kirsch 算子的 8 个方向模板

设:某像素点以 m_0 为中心,与周围 8 个邻域像素点 m_i ($i=$

$1,2,\dots,8$) 组成一个 3×3 模板窗口,在图像 F 中任意一像素点 $f(x,y)$ 作为模板窗口中心点,原始 LBP 采用模板中心点灰度像素值作为阈值,而 Kirsch-LBP 纹理特征的阈值选用模板均值 m_c ,其表达式为:

$$m_c = \sum_{i=0}^8 m_i / 9 \quad (5)$$

其像素点 $f(x,y)$ 的 Kirsch-LBP 特征值由式(6)计算获得:

$$KLBP(f(x,y)) = \sum_{j=1}^8 B(M_j W(x,y) - m_c) \times 2^{j-1} \quad (6)$$

其中, $M_j \cdot W(x,y)$ 表示 Kirsch 算子 8 个方向的边缘强度响应值, $B(C_j - m_c)$ 是阈值比较函数,即:

$$B(C_j - m_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } C_j > m_c, j=1,2,\dots,8 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

按照旋转不变 LBP 算子原理获得一个 Kirsch-LBP 纹理特征值,并将图像 F 中每个对应的像素点 $f(x,y)$ 用该纹理特征值代替,因而提取 Kirsch-LBP 特征之后将得到一幅具有更强抗光照性能的纹理图像(见图 2)。图 2 中:(a)、(b)表示亮、暗光线图样及其颜色直方图;(c)、(d)表示原始图像不同亮度对应的 Kirsch-LBP 纹理图及其纹理特征直方图。

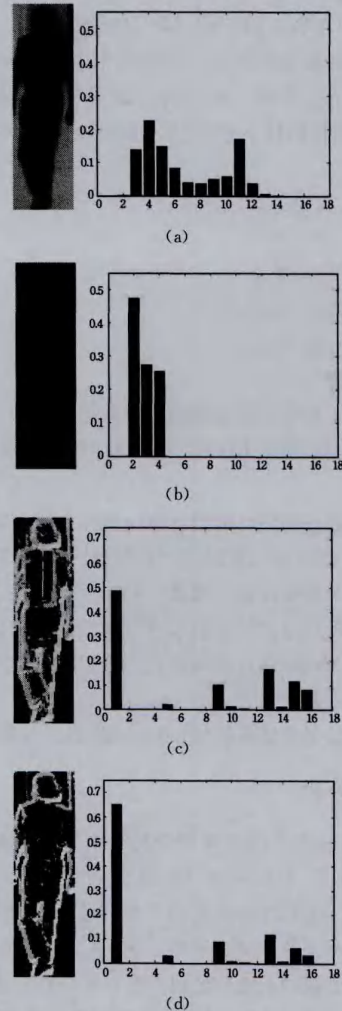


图 2 不同光线图及对应直方图

2.3 相似度度量

MS 算法中往往采用 Bhattacharyya 距离来度量目标区域与候选区域的相似性程度,即:

$$d(Y_0) = \sqrt{1 - \rho[\hat{p}_u(Y_0), \hat{q}_u]} \quad (8)$$

其中 Bhattacharyya 系数为:

$$\rho(Y_0) = \rho[\hat{p}_u(Y_0), \hat{q}_u] = \sum_{u=1}^m \sqrt{\hat{p}_u(Y_0) \hat{q}_u} \quad (9)$$

式中, m 为直方图 bin 柱个数, $\rho(Y_0)$ 取值在 $[0, 1]$ 之间, 当 $\rho(Y_0)$ 值越大时, 相似性越大, 其中, $\rho(Y_0) = 1$ 表示完全相似。图 2 中 2 幅不同光线图所对应的相似度系数见表 1, 表 1 说明 Kirsch-LBP 纹理特征具有较强的抗光照性能。

表 1 2 种特征的相似性系数

	颜色特征	Kirsch-LBP 纹理
相似性系数	0.443028	0.981447

2.4 融合策略

在实际应用中, 光照变化是常常发生的事情, 经典 MS 目标跟踪采用的颜色特征虽然具有多种优势, 但不具有抗光性能。为了克服光照变化带来的影响, 本文引入改进的纹理特征——Kirsch-LBP 纹理特征, 将该特征与颜色特征线性加权融合构成新的权值, 以估计目标位置状态。本文采用的线性加权公式如式(10)所示, 其中, w_{color} 、 w_{lbp} 分别是颜色特征的权值和改进纹理特征的权值, MS 目标跟踪中采用的权值如式(11)所示; 加权系数通过不同特征相似性系数间的关系计算得到, ρ_{lbp} 、 ρ_{color} 分别表示目标区域与候选区域的 Kirsch-LBP 纹理特征相似性系数和颜色相似性系数, 如式(12)、式(13)所示。

$$w = \alpha w_{color} + \beta w_{lbp} \quad (10)$$

$$w_i = \sum_{u=1}^m \sqrt{\frac{q_u}{p_u(Y_0)}} \quad (11)$$

$$\alpha = \rho_{lbp} / (\rho_{lbp} + \rho_{color}) \quad (12)$$

$$\beta = \rho_{color} / (\rho_{lbp} + \rho_{color}) \quad (13)$$

2.5 算法步骤

(1) 利用矩形框选择初始帧中感兴趣的运动对象, 记录跟踪框的位置信息, 建立 Kirsch-LBP 纹理特征与颜色特征概率目标模型。

(2) 利用前一帧估计的矩阵框位置作为当前帧的位置, 计算当前帧 Kirsch-LBP 纹理特征与颜色特征概率目标模型。

(3) 根据 2 种特征建立权重, 并通过相似性系数的关系构建加权系数, 最后通过加权系数进行线性加权融合权重。

(4) 利用 Mean Shift 原理迭代, 求出目标最终估计位置信息。

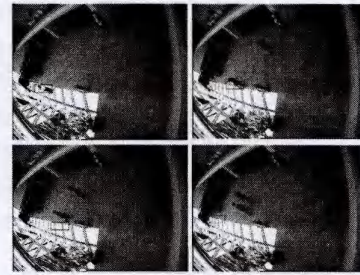
(5) 判断是否是最后一帧, 不是则跳到(2); 否则, 退出。

3 实验与分析

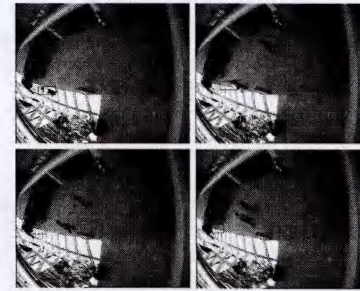
本节验证场景中存在光照变化时本文算法的性能, 采用的实验平台是 Microsoft visual Studio 2012 结合开源 opencv2.4.0。选用跟踪对象均在光线变化下运动的 2 类视频, 第 1 类表示亮区域突变到暗区域, 第 2 类表示光线逐渐变亮, 并在这 2 个视频上进行经典 MS 目标跟踪算法、LBP 纹理与 RGB 颜色融合的 Mean Shift 算法与算法的实验对比。为了方便叙述, 本文将经典 MS 目标跟踪算法简称为 CMS; LBP 纹理与 RGB 颜色融合的 Mean Shift 算法简称为 CLMS。

第 1 个视频(简称视频 1)是截取自 CAVIAR 项目中“Meet_WalkTogether1.mpg”的部分视频, 所选用场景为一个

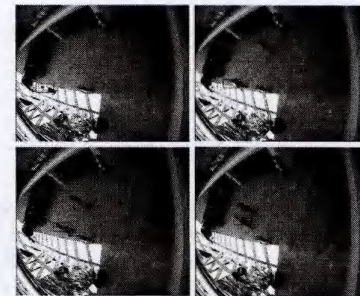
行人从光线较亮区域走向光线较弱区域, 且存在姿态变化, 视频图像分辨率为 384×288 , 帧率为 25frame/s。CMS、CLMS 及本文算法的部分实验结果如图 3 所示。



(a) CMS



(b) CLMS



(c) 本文算法

图 3 视频 1 的不同算法跟踪结果

图 3 中, 从左到右、从上至下依次表示视频图像第 7、47、61 和 111 帧的跟踪结果。图 3(a)中, 由于颜色对光线变化较为敏感, 因此跟踪丢失; 图 3(b)中, 虽然 LBP 纹理具有一定的抗光性, 但是光线发生剧烈变化时, 也不能很好地克服光线变化的影响, 导致跟踪丢失; 图 3(c)中, 本文算法提出的纹理方法具有克服光线突变的功能, 结合对光线不太敏感的 HSV 颜色空间, 能有效地提高跟踪性能。每帧的跟踪误差对比见图 5(a), 整个视频的平均跟踪误差见表 2。

表 2 跟踪误差(均值±标准差)

	视频 1	视频 2
CMS	46.1782±26.6583	12.1848±2.1382
CLMS	39.9098±25.7389	11.0768±2.5060
本文算法	7.7797±6.5686	7.0635±2.7005

第 2 个视频(简称视频 2)来源于室外拍摄的 PETS2001 DATASET5 图像数据集, 选定跟踪场景为相对运动的车辆以及光线逐渐增亮场景, 该视频图像分辨率为 384×288 , 帧率为 25frame/s。3 种目标跟踪算法的跟踪结果如图 4 所示。从左到右、从上至下依次是视频图像第 10、50、114 和 216 帧的跟踪结果。在跟踪过程中光线逐渐变亮, 变化微小, 因此 3 种算法都能够跟踪到目标, 从图 4 看其似乎差别不大, 但从每

帧的跟踪误差对比(图 5(b))中,可以明显看出本文算法的有效性,整个视频的平均跟踪误差见表 2。

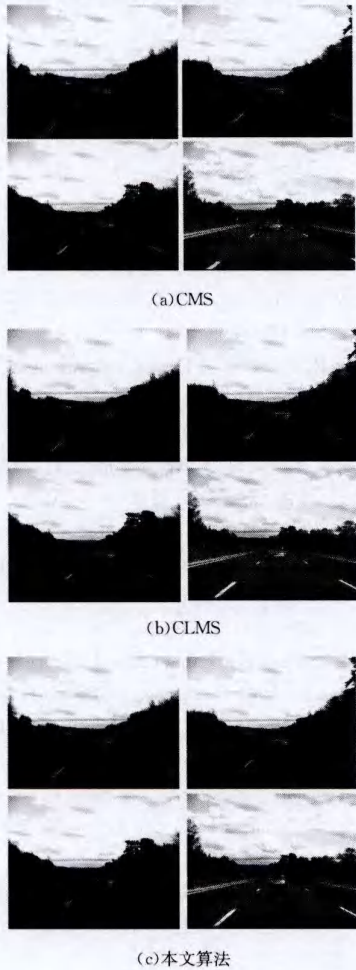
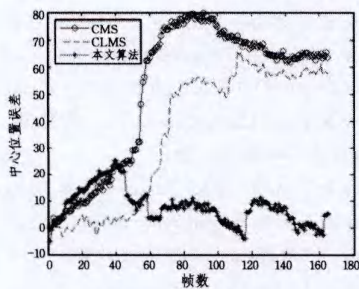
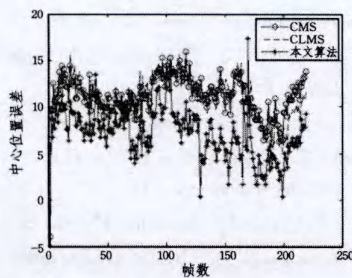


图 4 视频 2 的不同算法跟踪结果



(a) 视频 1 的跟踪误差对比



(b) 视频 2 的跟踪误差对比

图 5 跟踪误差对比

结束语 在场景中含有光线变化的情况下,CMS 算法容

易导致目标跟踪产生偏差甚至丢失目标。因此,本文提出一种具有抗光性能的 Kirsch-LBP 纹理特征,与 HSV 颜色空间进行融合,建立 Mean Shift 目标跟踪中的权重,并利用 Mean-Shift 原理估计目标跟踪最终状态位置。通过实验分析可知:在光照突变以及姿态变化的情况下,本文算法的跟踪准确度明显优于 CMS 及 CLMS 算法。因此,基于自适应阈值 Kirsch-LBP 纹理特征的均值漂移目标跟踪算法,可广泛适用于光照变化和姿态变化等复杂场景下的目标跟踪。

参考文献

- [1] Fukunaga K, Hostetler L. The Estimation of The Gradient of A Density Function with Application in Pattern Recognition[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1975, 21(1): 32-40
- [2] 陈东岳, 陈宗文. 基于特征显著性的均值漂移鲁棒目标跟踪[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(11): 1807-1812
Chen Dong-yue, Chen Zong-wen. Meanshift Robust Object Tracking Based on Feature Saliency[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(11): 1807-1812
- [3] 王宇雄, 章毓晋, 王晓华. 4-D 尺度空间中基于 Mean-Shift 的目标跟踪[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1626-1632
Wang Yu-xiong, Zhang Yu-jin, Wang Xiao-hua. Mean-Shift Object tracking through 4-D Scale Space[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(7): 1626-1632
- [4] Comaniciu D, Meer P. Mean Shift: Arobust Application toward Feature Space Analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619
- [5] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Kernel-based object tracking [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(5): 564-575
- [6] 顾幸方, 茅耀斌, 李秋洁. 基于 Mean Shift 的视觉目标跟踪算法综述[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 16-24
Gu Xing-fang, Mao Yao-bin, Li Qiu-jie. Survey on Visual Tracking Algorithms Based on Mean Shift [J]. Computer Science, 2012, 39(12): 16-24
- [7] 夏瑜, 吴小俊, 王洪元. 双环 Mean Shift 视频跟踪算法[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(1): 20-27
Xia Yu, Wu Xiao-jun, Wang Hong-yuan. Double-Ring Mean Shift Algorithm for Visual Tracking [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 20-27
- [8] 徐少平, 李春泉, 胡凌燕, 等. 一种改进的颜色共生矩阵纹理描述符[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(1): 90-98
Xu Shao-ping, Li Chun-quan, Hu Ling-yan, et al. An Improved Color Cooccurrence Matrix Texture Descriptor [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 90-98
- [9] Bousetouane F, Dib L, Snoussi H. Improved mean shift integrating texture and color features for robust real time object tracking [J]. The Visual Computer, 2013, 29(3): 155-170
- [10] 姚原青, 李峰, 周书仁. 基于纹理-颜色特征的目标跟踪[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(8): 1581-1588
Yao Yuan-qing, Li Feng, Zhou Shu-ren. Target tracking based on color and the texture feature [J]. Computer Engineering & Science, 2014, 36(8): 1581-1588
- [11] 周书仁, 殷建平. 基于 Haar 特性的 LBP 纹理特征[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1909-1926
Zhou Shu-ren, Yin Jian-ping. LBP Texture Feature Based on Haar Characteristics [J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 1909-1926

[12] 于焯,陆建华,郑君里.一种新的彩色图像边缘检测算法[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(10):1339-1343
Yu Ye, Lu Jian-hua, Zheng Jun-li. Color image edge detection algorithm[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Tech-

nology), 2005, 45(10): 1339-1343

[13] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects using Mean Shift[C]//IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. 2000:142-149

(上接第 293 页)

对于不同的约束条件,约束程度由弱到强依次是:或约束,单约束,与约束;对于同一约束条件,约束属性隶属度的取值越大,约束程度越强。由表 6 和表 7 可以看出,约束条件从上到下约束程度依次增强。对于稀疏数据集和稠密数据集,在相同的模糊形式背景下,随着约束程度的增强,构造的满足约束的模糊概念格节点数目减少,建格时间明显减少;反之,随着约束程度的减弱,构造的模糊概念格节点数目增加,建格时间也增加。

综合上面的实验结果可以看出,本文提出的 CFCL 算法在不同的约束条件下,能够构造满足用户不同需求的概念格,同时能够不同程度地节约模糊概念格的存储空间和建格时间,尤其在约束程度较强时效果更为突出。

结束语 当应用模糊概念格进行知识提取时,一些模糊概念格中节点并不满足用户的需求,同时随着处理数据的增多,构造模糊概念格的时空复杂度呈指数级增长。本文将用户的需求定义为约束,研究了一种基于约束的模糊概念格构造算法。该算法适用于文中定义的约束,利用约束指导模糊概念格的构造过程,使构造的模糊概念格更具针对性,并通过实验验证了该算法能够节约模糊概念格的存储空间和建格时间。本文定义的约束表达范围有限,能满足用户关心的属性隶属度大于某一取值的需求,下一步的工作是扩展约束条件的表示范畴,使得约束能够满足用户更多的需求,进而构造满足约束的模糊概念格。在此基础上,如何进一步提高模糊概念格的构造效率也是未来的工作方向。

参 考 文 献

[1] Ganter B, Wille R. Formal Concept Analysis[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999

[2] 柴玉梅,王春丽,王黎明.基于频繁项集的互补替代关系挖掘算法[J].模式识别与人工智能,2012,25(1):157-165
Chai Yu-mei, Wang Chun-li, Wang Li-ming. An Algorithm for Mining Complement-Alternative Relationship Based on Frequent Itemsets [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 25(1): 157-165

[3] 柴玉梅,张卓,王黎明.基于频繁概念直乘分布的全局闭频繁项集挖掘算法[J].计算机学报,2012,35(5):990-1001
Chai Yu-mei, Zhang Zhuo, Wang Li-ming. An Algorithm for Mining Global Closed Frequent Itemsets Based on Distributed Frequent Concept Direct Product[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(5): 990-1001

[4] 王黎明,张卓.基于 Iceberg 概念格并置集成的闭频繁项集挖掘算法[J].计算机研究与发展,2007,44(7):1184-1190
Wang Li-ming, Zhang Zhuo. An Algorithm for Mining Closed Frequent Itemsets Based on Apposition Assembly of Iceberg Concept Lattices [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(7): 1184-1190

[5] Young P. Software Retrieval by Samples Using Concept Analysis [J]. The Journal of Systems and Computer, 2000, 54(3):

179-183

[6] Belohlavek R, Sklenar V. Formal Concept Analysis Constrained by Attribute-Dependency Formulas[C]//Proc of the 3rd International Conference on ICFA. Lens, France, 2005:176-191

[7] Belohlavek R, Vychodil V. Formal Concept Analysis with Constraints by Closure Operators[C]//Proc of 14th International Conference on Conceptual Structures (ICCS 2006). Aalborg, Denmark, 2006:131-143

[8] Belohlavek R, Vychodil V. Formal concept analysis with background knowledge: Attribute priorities [J]. IEEE Transactions on Systems, 2009, 39(4): 399-409

[9] 张继福,张素兰,蒋义勇.约束概念格的代数性质及其知识表示的完备性[J].模式识别与人工智能,2010,23(3):289-299
Zhang Ji-fu, Zhang Su-lan, Jiang Yi-yong. Algebraic Properties of Constrained Concept Lattice and Its Completeness of Knowledge Representation [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2010, 23(3): 289-299

[10] Belohlavek R. What is a Fuzzy Concept Lattice? [C]//Proc of the 13th International Conference on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing. Moscow, Russia, 2011: 19-26

[11] Burusco A, Fuentes-Gonzalez R. The Study of the L-Fuzzy Concept Lattice [J]. Mathware & Soft Computer, 1994, 1(3): 209-218

[12] Fan Shi-Qing, Zhang Wen-Xiu, Xu Wei. Fuzzy Inference Based on Fuzzy Concept Lattice [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157(24): 3177-3187

[13] 宋笑雪,张文修,李红.变精度对象概念格的构造及其性质[J].计算机科学,2010,37(12):197-214
Song Xiao-xue, Zhang Wen-xiu, Li Hong. Construction and Properties of Variable Threshold Object-oriented Concept Lattices [J]. Computer Science, 2010, 37(12): 197-214

[14] Belohlavek R. Fuzzy Galois Connections[J]. Mathematical Logic Quarterly, 1999, 45(4): 497-504

[15] Belohlavek R. Algorithms for Fuzzy Concept Lattices[C]//Proc of the 4th International Conference on Recent Advances in Soft Computing. Nottingham, UK, 2002: 200-205

[16] Belohlavek R, De Baets B, Outrata J, et al. Computing the Lattice of All Fixpoints of a Fuzzy Closure Operator [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(3): 546-557

[17] 张卓,柴玉梅,王黎明,等.模糊形式概念并行构造算法[J].模式识别与人工智能,2013,26(3):260-269
Zhang Zhuo, Chai Yu-mei, Wang Li-ming, et al. A Parallel Algorithm Generating Fuzzy Formal Concepts[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(3): 260-269

[18] Belohlavek R, Vychodil V. Reducing The Size of Fuzzy Concept Lattices by Hedges[C]//The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Reno, Nevada, USA, 2005: 663-668

[19] Belohlavek R, Vychodil V. Reducing The Size of Fuzzy Concept Lattices by Fuzzy Closure Operators[C]//ISIS 2006. Tokyo, Japan, 2006: 309-314