

基于直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪的弹道中段目标识别方法

雷阳¹, 孔韦韦², 雷英杰³

(1. 武警工程大学 电子技术系网络与信息安全武警部队重点实验室, 陕西 西安 710086 ;
2. 武警工程大学 通信工程系, 陕西 西安 710086 ; 3. 空军工程大学 防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 针对核匹配追踪算法(KMP, kernel matching pursuit)进行全局最优搜索导致学习时间过长这一缺陷, 汲取直觉模糊 c 均值聚类(IFCM, intuitionistic fuzzy c -means)算法的动态聚类特性优势, 提出一种基于直觉模糊 c 均值聚类的核匹配追踪(IFCM-KMP, intuitionistic fuzzy c -means kernel matching pursuit)算法, 且对 UCI 库中 4 组实际样本数据进行了分类实验及有效性测试。最后, 选取高分辨距离像(HRRP)这一弹道中段目标识别常用的特征属性, 对其进行特征提取获得子像, 并分别采用 FCM, KMP, IFCM-KMP 3 种算法对真弹头进行目标识别仿真实验及结果对比分析, 充分表明了 IFCM-KMP 算法用于弹道中段目标识别较之 FCM、KMP 的优越性及有效性。

关键词: 直觉模糊集; c 均值聚类; 模糊 c 均值聚类; 核匹配追踪; 高分辨距离像; 目标识别

中图分类号: TP182; TP391

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)11-0136-08

Technique for target recognition based on intuitionistic fuzzy c -means clustering and kernel matching pursuit

LEI Yang¹, KONG Wei-wei², LEI Ying-jie³

(1. Network and Information Security Key Laboratory of Electronics Department, Engineering University of Armed Police Force, Xi'an 710086, China;

2. Department of Information Engineering, Engineering University of Armed Police Force, Xi'an 710086, China;

3. Institute of Air Defense Against Missile, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Kernel matching pursuit requires every step of searching process be global optimal searching in the redundant dictionary of function. Namely, the dictionary learning time of KMP was too long. To the above drawbacks, a novel technique for KMP based on IFCM was proposed to substitute local searching for global searching by the property superiority of dynamic clustering performance, which was also the superiority in Intuitionistic fuzzy c -means algorithm. Then two testing including classification and effectiveness were carried out towards four real sample data. Subsequently, high resolution range profile (HRRP) was selected from the classical properties of target recognition in the middle ballistic trajectory, which were extracted for getting sub-range profile. Finally, three algorithms including FCM, KMP, IFCM-KMP were carried out respectively towards different kinds of sub-range profile samples in emulation platform, the conclusion of which fully demonstrates that the IFCM-KMP algorithm is superior over FCM and KMP when it comes to target recognition in the middle ballistic trajectory.

Key words: intuitionistic fuzzy sets; c -means clustering; fuzzy c -means clustering; kernel matching pursuit; high resolution range profile; target recognition

收稿日期: 2011-05-31; 修回日期: 2011-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61272011, 61272492)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61272011, 61272492)

1 引言

弹道导弹自问世以来,以其射程远、威力大、精度高和生存能力强等优点成为战争中的“杀手锏”。作为对立面,弹道导弹防御系统应运而生。从 20 世纪 60 年代起,其研究热点几经调整,从对再入段“大气过滤”拦截的研究,到对天基助推段拦截的研究,直至近年来对大气层外中段拦截的研究,而如何解决目标识别一直是其核心难题之一。目前美国对国家导弹防御系统(NMD, national missile defense)有效性的怀疑也集中在对真弹头的有效识别上,因此目标识别问题仍是困扰 NMD 系统发展的一个“瓶颈”。

支撑向量机、相关向量机及核匹配追踪是近年来新兴的 3 种机器学习方法^[1],而核匹配追踪的提出为模式识别领域提供了一种崭新有效的核机器学习方法,它将某些在低维空间线性不可分的问题转化为高维空间线性可分的问题以期实现解决,核匹配追踪分类器的分类性能与支撑向量机基本相当,但却具有更为稀疏的解^[2],因而核匹配追踪的起步期发展已成功应用于目标分类^[3]、图像识别^[4-6]、雷达目标识别^[7]、特征模式识别^[8]、人脸识别、数据挖掘等领域。

虽然核匹配追踪的优良特性已成功服务于目标识别,但在处理大量数据集时,KMP 为了在高度冗余函数字典中选取最佳匹配的数据结构,每一步搜索过程都需进行全局最优搜索,必然导致学习时间过长。而基于目标函数的 IFCM^[9]这一局部最优的动态聚类算法,可通过多次修正聚类中心、直觉模糊划分隶属矩阵和直觉模糊划分非隶属矩阵进行动态迭代,可将粗糙的数据集分割成几个小型的字典空间进行局部搜索,从而减少了学习时间,降低了计算复杂度。因此,本文汲取 IFCM 算法的动态聚类优势,尝试将 KMP 算法中的核函数字典划分成若干小型字典,从而进行局部搜索,克服全局最优搜索所致过长时间的学习过程。

在弹道导弹防御系统中段,目标飞行过程较之助推段、再入段,具有较长的识别及拦截时间,因此,导弹防御系统把更多的力量集中在中段,它被认为是导弹防御的关键阶段。但是由于没有大气阻力,诱饵、碎片、干扰物与真弹头的飞行速度是一致的,这给目标识别系统带来了极大的困难。高分辨一维距离像是目标散射点回波在雷达射线上投影的向量和,可提供目标散射点的强度和位置信

息,反映目标的形状和结构等特征。相对雷达目标像,HRRP 更容易获取。因而本文选取 HRRP 这一弹道中段的常用特征属性,并对其进行特征子像提取,将所获得的数据用于进行目标识别。

本文的研究目的是将 KMP 与 IFCM 有效结合,用于进行 HRRP 特征子像数据的目标识别,为弹道中段目标识别提供一种新的尝试。鉴于此,本文提出了一种直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪的目标识别方法。首先,对 UCI 数据库中 4 组实际样本数据进行分类实验及有效性测试,验证 IFCM-KMP 算法的有效性。其次,采用 FCM, KMP, IFCM-KMP 3 种算法分别对真弹头进行目标识别仿真实验及结果对比分析,充分表明了 IFCM-KMP 算法用于弹道中段目标识别较之 FCM、KMP 的优越性。

2 核匹配追踪算法

2.1 基本匹配追踪

给定 l 个观测点 $\{x_1, \dots, x_l\}$, 相应的观测值为 $\{y_1, \dots, y_l\}$ 。基本匹配追踪(BMP, basic matching pursuit)的基本思想是:在一个高度冗余的字典(dictionary)空间 D 中将观测值 $\{y_1, \dots, y_l\}$ 分解为一组基函数的线性组合来逼近 $y_j (j=1 \sim l)$, 其中,字典 D 是定义在 Hilbert 空间中的一组基函数^[10,11]。假定字典包含 M 个基函数: $D = \{g_m\}, m = 1, 2, \dots, M$ 。对观测值 $y_j (j=1 \sim l)$ 逼近的基函数向量的线性组合函数为

$$f_{N,j} = \sum_{i=1}^N a_i g_i(x_j) \quad (1)$$

基本匹配追踪算法在每一步的优化迭代中,针对当前残差寻找与之相关系数最大的基函数 g_{m_N} 及其系数 a_N , 观测值在第 N 代的逼近为

$$f_N = \sum_{k=1}^{N-1} a_k g_{m_k} + a_N g_{m_N} \quad (2)$$

然而,当增加 $a_N g_{m_N}$ 后,匹配追踪在第 N 代对观测值的逼近并不一定是最优的;可以通过后拟合的方法修正 f_N , 使其进一步逼近观测值^[12]。所谓后拟合就是增加 $a_N g_{m_N}$ 项后,重新调整系数 a_1, a_2, \dots, a_N , 使得当前的残差能量最小,即

$$a_1, \dots, a_N = \arg \min_{a_1, \dots, a_N} \|f_N - y\|^2 = \arg \min_{a_1, \dots, a_N} \left\| \sum_{k=1}^N a_k g_k - y \right\|^2 \quad (3)$$

上式的优化过程是一个非常耗时的计算，通常采用折中的方法：匹配追踪算法在迭代运算数步后进行一次后拟合^[11]。

2.2 核匹配追踪

核匹配追踪本质是采用核方法生成函数字典，它是一种利用核函数集进行寻优的匹配追踪方法，在 BMP 算法的基础上，给定具体的核函数来代替函数 g ，进而寻找权系数 β_i 和基函数数据 x_i ，从而得到有效地分类器，再利用训练得到的分类器对目标进行分类识别。

假设 $L=\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$ 是一个含有 l 个输入输出，从一个未知的分布 $P(X, Y)(X \in I_R^d, Y \in I_R)$ 中独立采样出的数据对，基于训练数据的核函数集 $D = \{K(x, x_i) | i=1, L, l\}$ ，且考虑到常数项，则逼近函数可表示为

$$f_N(x) = \sum_{i=1}^n w_i K(x, x_i) + w_0 \quad (4)$$

其中 x_i 是分类器基函数数据，训练过程是以 $L=\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$ 为训练集的有限维数据空间。

3 基于目标函数的直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪算法

在处理大量数据集时，KMP 为了在高度冗余的函数字典中选取最佳匹配的数据结构，每一步搜索过程都需进行全局最优搜索，因此 KMP 的学习时间是相当长的。因而结合基于目标函数的 IFCM 这一局部最优的动态聚类算法，通过多次修正聚类中心、直觉模糊划分隶属矩阵及直觉模糊划分非隶属矩阵进行动态迭代，可将核函数字典分割成几个小型的字典空间进行局部搜索，减少计算时间，降低计算复杂度。

3.1 IFCM-KMP 算法及步骤

下面给出 IFCM-KMP 算法的详细步骤。

输入：样本数据集 $L=\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$ ，平滑参数 $m(1 < m < \infty)$ ，核参数 $s (s > 0)$ ，聚类类别数 $c (2 < c < n)$ 。

输出：划分直觉模糊隶属矩阵 U_μ ，划分直觉模糊非隶属矩阵 U_γ ，聚类原型 P ，迭代次数 b, N ，多个小型函数字典 $D=\{d_1, \dots, d_c\}$ ，最优权系数 β_j 和基函数数据 \bar{x}_j ，判决函数 f_{i_0} 。

Step1 初始化。核函数 K ，此处选取高斯核函数 $K(x, x_i) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / 2s^2)$ ，设定核参数为直觉

模糊聚类区间 C 的个数。计算样本数据个数 n ，设定迭代停止阈值 e, β_i ，初始化聚类原型模式 $P^{(0)}$ ，设置迭代计数器 $b=0$ 。

Step2 对于数据集 $X = \{x_1, \dots, x_l\}$ ，利用 IFCM 算法计算更新聚类原型模式矩阵 $p_i^{(b+1)}$ ，由于该聚类原型矢量 $p_i^{(b+1)}$ 各维特征上的赋值是一直觉模糊数，需分别进行最优化从而得到其划分直觉模糊隶属矩阵 U_μ 和划分直觉模糊非隶属矩阵 U_γ 的迭代式 (5)、式(6)，并求得 $p\mu_i^{(b+1)}$ 和 $p\gamma_i^{(b+1)}$ 。在直觉模糊集中，已知隶属度与非隶属度可易得犹豫度，因此其迭代公式可通过式(5)、式(6)易得，如式(7)所示，并求得 $pp_i^{(b+1)}$ 。

$$p m_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{j=1}^n \left((m_{ij})^m / 2 + (1 - g_{ik})^m / 2 \right) x m_j}{\sum_{j=1}^n \left((m_{ij})^m / 2 + (1 - g_{ik})^m / 2 \right)} \quad (5)$$

$$p g_i^{(b+1)} = \frac{\sum_{j=1}^n \left((m_{ij})^m / 2 + (1 - g_{ik})^m / 2 \right) x g_j}{\sum_{j=1}^n \left((m_{ij})^m / 2 + (1 - g_{ik})^m / 2 \right)} \quad (6)$$

$$pp_i^{(b+1)} = 1 - p m_i - p g_i \quad (7)$$

Step3 如果 $p^{(b)} - p^{(b+1)} > e$ ，则令 $b=b+1$ ，转向 Step1；否则，由下式分别输出划分隶属矩阵 U_μ 、划分非隶属矩阵 U_γ 和聚类原型 P ，反复迭代得到的 U_μ 、 U_γ 及 P 为被分割的多个小型函数字典 $D=\{d_1, \dots, d_c\}$ 。下式中 $S_w(x_j, p_i)$ 表示样本 x_j 与聚类原型 p_i 之间的距离。

对于 $\forall i, j$ ，如果 $S_w(x_j, p_k)^{(b)} > 0$ ，则有

$$\begin{cases} m_{ij}^{(b)} = \left\{ \sum_{k=1}^c \left(\frac{S_w(x_j, p_i)^{(b)}}{S_w(x_j, p_k)^{(b)}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right\}^{-1} \\ g_{ij} = 1 - p_{ij} - \left\{ \sum_{k=1}^c \left(\frac{S_w(x_j, p_i)^{(b)}}{S_w(x_j, p_k)^{(b)}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right\}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

如果 $\exists k$ ，使得 $S_w(x_j, p_k)^{(b)} = 0$ ，则有

$$\begin{cases} m_{ij} = 1, & g_{ij} = 0, & i = k \\ m_{ij} = 0, & g_{ij} = 1, & i \neq k \end{cases} \quad (9)$$

Step4 确定最优权系数 β_j 和基函数数据 \bar{x}_j 。

从训练数据集中选 $x_i=x_1$ ，求出 $y_1(x)=K(x,x_1)$ ，利用极小值 $\min_w \|y-w_1 y_{(1)}(x)\|$ 准则求出 $w_1 = y_{(1)}^T(x) / \|y_{(1)}(x)\|^2$ （本质上是一个求解最小二乘解问题），然后求出 $\Delta y_1 = \|y-w_1 y_{(1)}(x)\|$ 。依次选 $x_i=x_2, \dots, x_l$ ，求出 $?y_2, \dots, ?y_l$ ，取 $?y_1, \dots, ?y_l$ 中最小的所对应的 x_i 作为第一个基函数数据 \bar{x}_1 。

Step5 假设已求出 L 个权系数和基函数数据，利用 KMP 思想，则第 $L+1$ 个求法如下：令 $y_L = y - \sum_{j=1}^L w_j K(x, \bar{x}_j)$ ，采用 Step4 中方法确定第 $L+1$ 个基函数数据，进而对 y_L 进行一次后拟合： $w_j = y_j^T K(x, \bar{x}_j) / \|K(x, \bar{x}_j)\|^2, j=1, 2, \dots, L+1$ ，其中， $y_j = y - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{L+1} w_i K(x, \bar{x}_i)$ 。

Step6 按照 Step4、Step5 依次计算 $D=\{d_1, \dots, d_c\}$ 中每个小型函数字典 $d_j (j=1, \dots, c)$ 的 $?j$ ，和 \bar{x}_j ，从核函数集中选取最小 y_j 所对应的 $?j$ ，和 \bar{x}_j 。

Step7 按照下式计算判决函数。

$$f_l(w_j, x_j) = \sum_{i=1}^L w_i^l g_i^l(x), j=1, L, l \quad (10)$$

Step8 令 $y=y-f_l$ ，若 $y < ?_l$ ，则返回 Step4，且每一个 d_j 的迭代次数 N 增大，直至算法收敛。

最后得到分类器 f_l 后，目标可通过下式进行分类获得

$$f_N(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N a_i g_i(x) \right) = \text{sgn} \left(\sum_{i=\{sp\}} a_i K(x, x_i) \right) \quad (11)$$

其中， $\{sp\}$ 表示核匹配追踪算法得到的支撑模式。

该算法涉及平滑因子参数 m 的数值选取。从数学角度看，参数 m 的出现并不自然且没有必要，但是对于从硬聚类准则函数推广得到的目标函数模糊聚类准则函数，如果不给隶属度赋一个权重，这种推广则是无效的。因而参数 m 又称为加权指数，控制着样本在模糊类间的分享程度。因此，要实现模糊聚类就必须涉及 m 的数值选取，然而最佳 m 的选取目前尚缺乏理论指导。参数 m 的取值范围大都来自实验及经验，均为启发式的，缺乏系统性，更无具体的优选算法及检验算法可循。这一系列的开放性问题，都值得进一步的探索，以便奠定 m 优选的理论基础。通常情况下选取 $m=2$ 。

该算法也涉及核函数参数 s 的选取。解决方法是

先将数据集分为 3 组，分别是训练数据集、验证数据集和测试数据集。其中，训练数据集用于训练分类器，测试数据集用于评估分类器的性能，而验证数据集则是用于确定核参数 s 的。实验验证是对给定的一组数据，将其分为 2 组，一组作为验证数据，一组作为测试数据，而训练数据是从验证数据中提取平均距离像得到的，这是由于平均距离像具有较好的目标方向变化稳定性，可以保证识别器具有良好的推广能力。

该算法输入的样本数据集 $L=\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$ ， $Y \in \{-1, +1\}$ 是一个 2 类分类问题，当样本数据集为多类分类问题时，通常有 2 种解决方法：第一种方法把 N 类分类问题转化为 N 个 2 类分类问题，其中，第 i 个问题是把属于第 i 类和不属于第 i 类的分开，这种方法需要 N 个分类器；第 2 种方法是直接把这 N 类进行两两判决，即每两类就需要一个分类器进行一对一的判决，这种方法需要 $N(N-1)/2$ 个分类器。为了减少计算复杂度，以下仿真实验均采用第一种方法通过训练 N 个分类器联合进行分类。

3.2 IFCM-KMP 分类实验及有效性测试

选取 UCI 数据库 (<http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>) 中 3 组实际样本数据 Iris, Wine, Breast Cancer Wisconsin(简记为 Wisc) 及 UCI 库外其他实际数据 Motorcycle，以上 4 组实际数据通常被用来检验聚类算法、分类算法的性能及有效性。Iris 数据是由 4 维空间的 150 个样本组成，每一个样本的 4 个分量分别表示 Iris 数据的 petal length、petal width、sepal length、sepal width。该数据共有 3 个种类 setosa、versicolor、virginica，每一个种类均有 50 个样本。Motorcycle 为一组实际生活中低维简单数据，共有 134 个样本数据，每个样本具有 3 个不同特征属性。Wine 和 Breast Cancer Wisconsin 2 类样本数据的特征属性此处不再赘述。基于以上 4 组数据分别对 FCM、KMP、IFCM-KMP 算法的分类性能进行仿真实验。

选取 Iris 数据对 IFCM-KMP 算法进行仿真实验。实验中选取高斯核函数 $K(x, x_i)=\exp(- \|x-x_i\|^2/2s^2)$ ，且设定核参数 $s^2=0.03$ ，平滑参数 $m=2$ ，聚类类别数 (即样本种类数) $c=3$ ，样本数据个数 $n=150$ ，迭代停止阈值 $e=10^{-5}$ 、 $?_t=0.2$ ，设置迭代计数器 $b=0$ 。Iris 数据是由 3 个不同种类的 150 个样本组成，且每个样本是基于 4 个连续属性的，其原始样本分布为第 1 个种类与其他 2 类完全分离，第 2 个种类与第 3 个种类之间有交叉。3 个种类在图 1 中分别表示为

“·”、“*”和“×”。采用 IFCM-KMP 算法进行分类时，由于 Iris 数据样本均是分布在 4 维空间中的，其分类效果通过 4 维或者 3 维空间都不易观察，因此将其映射到 2 维空间，产生 PCA 图对其分类样本的分布效果进行展示，如图 1 所示。由图清晰可见 IFCM-KMP 算法将 3 类样本明晰地分离开来，使得 Iris 样本中任意 2 类样本数据几乎没有交叉分布。

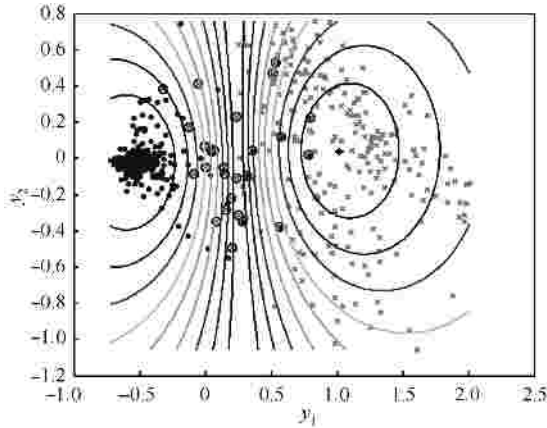


图 1 Iris 数据的 IFCM-KMP 2 维空间 PCA 映射

由于各参数设置不同，分类后的样本分布及错分误差也会不同，因而该算法的平均错分误差仅为 $e_1=0.0311$ 。同时采用 FCM、KMP、IFCM-KMP 算法分别对 Iris、Wine、Breast Cancer Wisconsin 和 Motorcycle 4 组数据进行仿真实验，表 1 给出以上 3 种算法在相同实验平台下选取 100 次不同参数的平均错分误差。由表 1 可知 IFCM-KMP 算法的分类识别效果最好，KMP 算法分类识别效果次之，FCM 算法较之其他 2 种分类效果最差。

表 1 3 种算法的平均错分误差值

数据集	FCM	KMP	IFCM-KMP
Iris	0.072 1	0.05 39	0.031 1
Wine	0.065 2	0.048 4	0.031 2
Wisconsin	0.074 4	0.045 8	0.032 3
Motorcycle	0.068 9	0.050 4	0.028 8

选取 Motorcycle 样本数据对该算法的有效性进行测试。在处理 Motorcycle 的 134 个样本数据时，首先采用 IFCM 算法将核函数分割成几个小型的字典空间并进行局部搜索，同时通过多次不断地修正聚类中心、划分直觉模糊隶属矩阵及划分直觉模糊非隶属矩阵进行动态迭代，如图 2 所示，“·”和“*”分别表示样本数据和局部最优动态聚类点，

经过数次迭代得到不同的局部最优动态聚类点，最后一次迭代得到的局部最优动态聚类点分布如图 2 所示。此外，每次迭代会产生不同的 7 项有效性指标值(partition coefficient(PC)、classification entropy(CE)、partition index(SC)、separation index(S)、xie and beni's index(XB)、dunn'index(DI)、alternative dunn index(ADI))。为比较 FCM、KMP 和 IFCM-KMP 算法的有效性能指标，3 种算法均选取 Motorcycle 样本数据进行实验，分别取最后一次迭代所得的 7 项性能指标值如表 2 所示。

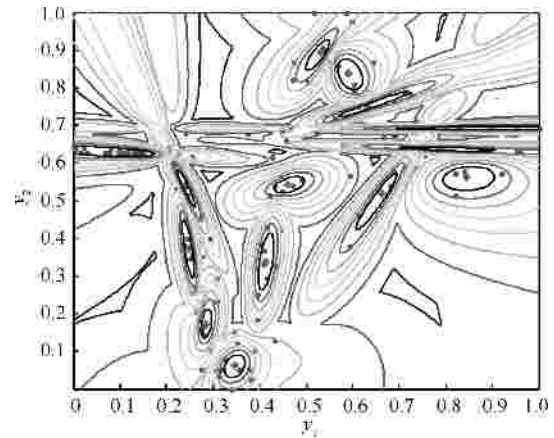


图 2 局部最优动态聚类中心点分布

表 2 Motorcycle 数据的 3 种算法有效性指标比较

性能指标	FCM	KMP	IFCM-KMP
PC	0.647 8	0.789 1	0.852 0
CE	0.643 3	0.332 4	0.852 1
SC	1.897 0	1.666 6	1.575 0
S	0.007 7	0.010 1	0.013 1
XB	3.111 0	2.841 2	2.110 1
DI	0.033 0	0.012 2	0.048 0
ADI	0.035 1	0.013 3	0.049 6

由表 2 中各项数据可知，该算法的 PC 值略大于 FCM、KMP 的 PC 值，说明该算法具有比其他 2 种算法更好的划分性能；FCM、IFCM-KMP 算法的 CE 值均较为接近各 PC 值，说明它们均具有较好的模糊聚类划分性能，而 KMP 算法的 CE 值与其 PC 值相差较大，说明 KMP 算法模糊聚类划分性能较弱；该算法的 SC 值略低于 FCM、KMP 的 SC 值，说明该算法划分得到的聚类比 FCM、KMP 划分得到的聚类更具紧密性；相反的，该算法的 S 值则略高于 FCM、KMP 的 S 值，说明被 FCM 和 KMP 划分后的聚类数据样本之间的分离度大于 IFCM-

KMP 划分后的聚类数据样本；该算法的 XB 值略小于 FCM、KMP 算法的 XB 值，说明其局部搜索、动态聚类的性能较强；该算法的 DI 值略大于 FCM、KMP 算法的 DI 值，说明其兼顾紧密性与分离度的能力更好；ADI 指标的作用是对 DI 指标进行修正，用更简单的计算方式将其值增大，3 种算法均达到了增大各 DI 值的效果。根据比较各算法的性能指标值可知，IFCM-KMP 算法是有效的。

4 直觉模糊 c 均值聚类核匹配追踪目标识别的仿真实验及分析

4.1 弹道中段目标识别

弹道导弹防御系统是指反洲际弹道导弹(ICBM, intercontinental ballistic missile)与反战术弹道导弹(TBM, tactical ballistic missile)，洲际弹道导弹与战术弹道导弹这 2 种导弹的基本飞行过程与模型体系相类似，均可在助推段、中段和再入段实现目标识别与拦截。在助推段(固体洲际导弹飞行时间在 80~200s，液体洲际导弹飞行时间在 4~5min)，诱饵尚未放出，拦截虽无需进行真假目标识别，又可形成一种攻势防御，但拦截技术难度较大，往往难以实现。在再入段(持续时间不到 1min)，大气的过滤作用使目标识别相对容易，但拦截时间短，风险大，且很难做到一次精准拦截，一般须多层拦截，导致代价过大。在中段(飞行时间为 20min 或更长)，目标飞行具备较长的识别及拦截时间，因此，导弹防御系统把更多的力量集中在中段，它被认为是导弹防御的关键阶段。但是由于没有大气阻力，诱饵、碎片、干扰物与真目标飞行的速度是一致的，这给目标识别系统带来了极大的困难。目前在弹道导弹中段，雷达识别是主要途径，而根据所提取特征，识别方法大致分为 3 种^[13]，分别是基于诱饵释放过程的识别方法、基于姿态特性的识别方法和基于结构特性的识别方法。而高分辨一维距离像是目标散射点子回波在雷达射线上投影的向量和，可提供目标散射点的强度和位置信息，反映目标的形状和结构等特征。相对基于雷达目标像，HRRP 更容易获取。根据 HRRP 这一目标特征，本文方法属于基于结构特性的目标识别方法。

4.2 基于 IFCM-KMP 弹道中段目标识别的仿真实验及分析

特征提取是弹道中段雷达一维高分辨距离像识别的重要环节。本文选取快速核最优变换与聚类

中心^[14](FKOT-CC)算法对特征属性子像进行提取。FKOT-CC 算法通过非线性变换，将数据映射到高维核空间，然后进行最优变换，且选取最优聚类中心，实现原空间数据的非线性特征提取，此外，利用训练集在核空间中所张成子空间的一组基线性地表示最优变换矩阵，可显著提高特征子像提取速度。为了较好地实现 IFCM-KMP 的目标识别，FKOT-CC 算法的输入样本数据集 $L=\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$ ，核函数 K 及核参数 $s(s > 0)$ 的选取均与 IFCM-KMP 算法相一致。在仿真实验中，首先采用 FKOT-CC 算法进行特征提取，将所得到的子像作为识别对象，最后分别采用 FCM、KMP、IFCM-KMP 算法进行目标分类，分析比较其性能。

弹道中段目标识别是在各种轻重诱饵(假目标)、末级运载火箭碎片及其他干扰物中识别真弹头。本文以锥球体所代表的弹头目标为例进行仿真实验，采用的数据(真弹头、假目标、碎片、干扰物)均是在微波暗室中对各类目标的缩比模型测量得到的。目标具体参数如下：总长 60mm，直径 140mm，锥角 13.4° ；雷达采用步进扫频测量方式，工作频率范围为 8.75~10.75GHz，步长 20MHz；目标横滚角和俯仰角均为 0° ，方位角范围是 $0\sim 180^\circ$ ，平均方位角采样间隔为 0.47° 。该数据是 121 维的，各类样本数分别为 65、77、58、50。实验中，采用等间隔从每类中选取一半作为训练数据，其余作为测试数据。

实验中，先提取数据特征子像。图 3 为弹道中段 4 类测试数据子像的空间散布，其中，“○”、“□”、“△”、“*”分别表示假目标、碎片、干扰物、真弹头的子像。由图 3 可知，各类子像间存在个别混叠现象，说明 FKOT-CC 算法能提取可分性较强的鉴别特征，其中微小的差别主要是由计算误差引起的。

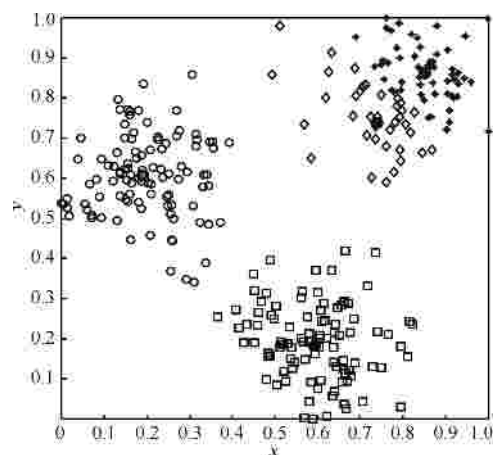


图 3 微波暗室数据的子像散布

针对以上各类子像进行 IFCM-KMP 分类仿真实验。选取高斯核函数 $K(x, x_i) = \exp(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2s^2})$ ，且设定核参数 $s^2 = 0.03$ ，平滑参数 $m = 2$ ，聚类类别数(即样本种类数) $c = 4$ ，样本数据个数 $n = 250$ ，迭代停止阈值 $e = 10^{-5}$ 、 $\rho_i = 0.2$ ，设置迭代计数器 $b = 0$ 。图 4 为采用 IFCM-KMP 算法进行分类仿真实验且将其映射到 2 维空间的 PCA 结果分布图。针对各类子像分别采用 FCM，KMP 算法进行分类仿真实验，同样得到图 5、图 6 的 2 维映射结果展示。图 4、图 5、图 6 中，“ \oplus ”、“ \otimes ”、“ \cdot ”和“ \times ”分别表示假目标、碎片、干扰物、真弹头。显然，IFCM-KMP 的分类效果最好，真弹头有效地被分离出来，其他 3 类样本也均聚集在各自聚类中心周围，错分误差 $e_1 = 0.233$ 。KMP 的分类效果较之 IFCM-KMP 次之，错分误差 $e_2 = 0.373$ 。而 FCM 的分类效果最差，真弹头与假目标混叠样本较多，没有达到分离真弹头的效果，错分误差 $e_3 = 0.741$ 。

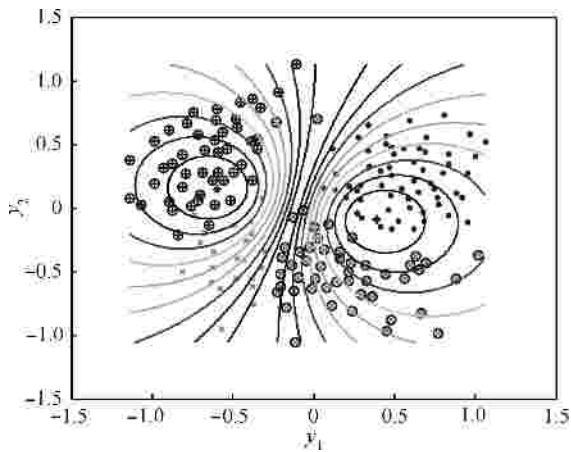


图 4 各类子像的 IFCM-KMP 2 维空间 PCA 映射

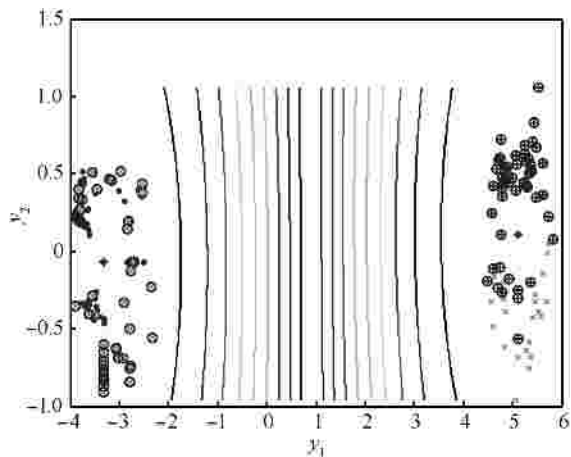


图 5 各类子像的 FCM 2 维空间 PCA 映射

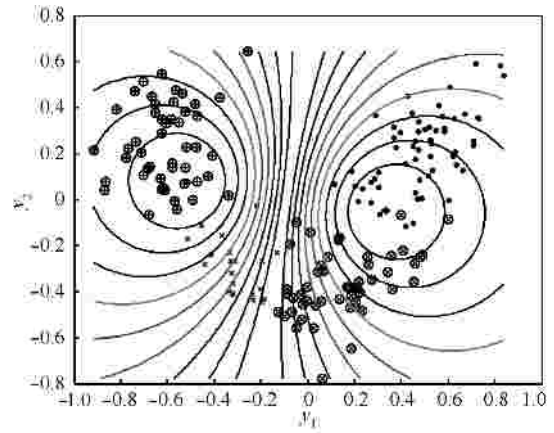


图 6 各类子像的 KMP 2 维空间 PCA 映射

根据各参数设置的变化，各类样本分布及错分误差也会有所不同。表 3 给出 FCM、KMP、IFCM-KMP 3 种算法在相同实验平台下选取 100 次不同参数的平均错分误差及真弹头的平均识别率。由表 3 可知，IFCM-KMP 对于真弹头的平均识别率较高，KMP 次之，而 FCM 平均识别率最低。IFCM-KMP 算法的运行速度较之 FCM 较慢，且在可承受的代价之内，但该算法较之 FCM 在分类性能上的明显优势，是经典 FCM 算法无法比拟的。该算法的运行速度是远远高于 KMP 算法的，可见该算法划分小函数字典进行局部搜索跳出 KMP 算法的全局搜索，确实有效地克服了全局搜索导致时间过长的缺陷。因此，较之 KMP 算法，该算法在时间复杂度及分类性能上都具有较大优势。因此，对于需兼顾识别效果及识别速度的弹道中段目标识别，IFCM-KMP 算法不失为一种较好的选择。

表 3 3 种算法的平均错分误差值、平均识别率及平均识别速度

算法	平均错分误差 e'	平均识别率 ρ	平均识别速度 s
FCM	0.755	0.481	0.800
KMP	0.381	0.773	12.100
IFCM-KMP	0.241	0.867	3.211

5 结束语

本文的主要贡献是基于核匹配追踪这一理论，利用直觉模糊 c 均值聚类算法的动态聚类优势将 KMP 算法中核字典划分成若干小字典并进行局部搜索，克服了 KMP 算法全局搜索的缺陷，大大地降低了算法复杂度，且得到了更好的分类识别效果。之后选取高分辨距离像这一弹道中段目标识别

时常用的特征属性，通过对其进行特征提取获得子像，从而分别采用 FCM，KMP，IFCM-KMP 3 种算法对真弹头进行目标识别仿真实验。仿真结果表明，虽然该算法的运行速度较之 FCM 较慢，且在可承受的代价之内，但该算法较之 FCM 在分类性能上的明显优势，是经典 FCM 算法无法比拟的。而较之 KMP 算法，该算法无论在时间复杂度及分类性能上都具有较大优势。因此，对于需兼顾识别率及时效性的弹道中段目标识别，IFCM-KMP 算法不失为一种较好的选择。但该算法仍有一些需改进和完善的地方，如平滑因子 m 、核参数 s 、停止阈值 θ 的确定方法，选取不同参数对目标识别结果的影响以及在真实弹道中段复杂环境下(非仿真环境下)采用该算法对真弹头进行目标识别的分类效果均是下一步有待探究的问题。

参考文献：

- [1] POPOVICI V, BENGIO S, THIRAN J P. Kernel matching pursuit for large datasets[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(12):2385-2390.
- [2] PASCAL V, YOSHUA B. Kernel matching pursuit[J]. Machine Learning, 2002, 48:165-187.
- [3] LIAO X J, LI H, KRISHNAPURAM B. An M-ary kernel matching pursuit classifier for multi-aspect target classification[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP)[C]. Montreal, Canada, 2004. 61-64.
- [4] 缙水平, 焦季成. 基于多尺度几何分析与核匹配追踪的图象识别[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(6):776-781.
GOU S P, JIAO L C. Image recognition based on multi-scale geometric analysis and kernel matching pursuit[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(6):776-781.
- [5] 缙水平, 焦季成, 张向荣. 基于免疫克隆与核匹配追踪的快速图象目标识别[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5):1104-1108.
GOU S P, JIAO L C, ZHANG X R. Kernel matching pursuit on immune clonal fast algorithm for image object recognition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5):1104-1108.
- [6] 缙水平, 焦季成, 张向荣. 基于免疫克隆的核匹配追踪集成图象识别算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1):79-85.
GOU S P, JIAO L C, ZHANG X R. Image recognition with kernel matching pursuit classifier ensemble based on immune clone[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2009, 22(1):79-85.
- [7] 马建华, 刘宏伟, 保铮. 利用核匹配追踪算法进行雷达高分辨距离像识别[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2005, 32(1):84-88.
MA J H, LIU H W, BAO Z. Radar HRRP recognition based on the kernel matching pursuit classifier[J]. Journal of Xi'an Electronic Technology University(Natural Science Edition), 2005, 32(1):84-88.
- [8] 李青, 焦季成, 周伟达. 基于模糊核匹配追踪的特征模式识别[J]. 计算机学报, 2009, 32(8):1687-1694.
LI Q, JIAO L C, ZHOU W D. Pattern recognition based on the fuzzy kernel matching pursuit[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(8):1687-1694.
- [9] 申晓勇, 雷英杰, 李进. 基于目标函数的直觉模糊集合数据的聚类方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 11(31):2732-2735.
SHEN X Y, LEI Y J, LI J. A clustering technique to intuitionistic fuzzy sets based on objective function[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 11(31):2732-2735.
- [10] DAVIS G, MALLAT S, ZHANG Z. Adaptive time-frequency decompositions[J]. Optical Engineering, 1994, 33(7):2183-2191.
- [11] MALLAT S, ZHANG Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal processing, 41(12):3397-3415.
- [12] PATI Y, REZAIFAR R, KRISHNAPRASAD P. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[A]. Proceedings of the 27th Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. CA, USA, 1993.40-44.
- [13] 李康乐, 刘永祥, 黎湘. 弹道导弹中段防御系统目标识别仿真研究[J]. 现代雷达, 2006, 11(28):12-19.
LI K L, LIU Y X, LI X. A study on simulation of target discrimination in ballistic missile mid-course defense system[J]. Modern Radar, 2006, 11(28):12-19.
- [14] 赵峰, 张军英, 刘敬. 基于核最优变换与聚类中心的雷达目标识别[J]. 控制与决策, 2008, 23(7):736-740.
ZHAO F, ZHANG J Y, LIU J. Radar target recognition based on kernel optimal transformation and cluster centers[J]. Control and Decision, 2008, 23(7):736-740.

作者简介：



雷阳(1984-),女,陕西西安人,博士,武警工程大学讲师,主要研究方向为智能信息处理与信息融合。



孔韦韦(1983-),男,安徽合肥人,博士后,武警工程大学讲师,主要研究方向为图像智能信息处理。

雷英杰(1956-),男,陕西渭南人,博士,空军工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为智能信息处理与智能决策等。