

심전도 자동 진단 알고리즘 및 장치 구현(IV)

- 특성표시기

권 혁제, 정 기삼, 송 철규, 신 건수, 이 명호

연세대학교 전기공학과

An implementation of automated ECG interpretation algorithm and system(IV)

- Typificator

H.J. Kweon, K.S. Jeong, C.G. Song, K.S. S. M.H. Lee

Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

Abstract

For the representative beat calculation and efficient rhythm analysis new method, that is, QRS typification were proposed. A problem that were resulted from pattern classification based on binary logic could be solved out by the fuzzy clustering and classification nodes could be reduced by using the proposed new feature vector. The accurate representative beat could be obtained by excluding the ST-T segment that happened outlier through ST-T segment typification procedure.

서 론

심전도 자동 진단에서 신뢰성 있는 리듬 분석 및 대표 비트 선택을 위해서는 각각의 QRS 컴플렉스 형태에 따른 라벨링 과정이 필요하다. 이와같은 QRS 컴플렉스에 대한 라벨링은 본질적으로 클러스터링 문제로 생각할 수 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 즉, 각각의 QRS 컴플렉스를 다차원의 특성 벡터로 나타낼 수 있다고 가정하면, 특징표시(typification) 문제는 고차원 파라미터 공간의 분할 구간을 찾는 것으로 설명할 수 있다. 각각의 부공간 집합이 같은 형태를 갖는 QRS 컴플렉스의 벡터를 가지고 있다고 가정하면 분할 구간을 찾는 문제는 어떤 파라미터가 QRS 컴플렉스의 형태를 가장 잘 나타내고 있는가, 그리고 어떤 클러스터링 또는 분할(partitioning) 알고리즘이 주어진 파라미터에 가장 적절한가 하는 2가지 문제로 나타낼 수 있다. QRS 특성표시를 위한 클러스터링 알고리즘은 기준이

되는 하나의 QRS 컴플렉스에 대한 파라미터 벡터와 다른 QRS 컴플렉스들의 파라미터 벡터들 사이에서 이들 QRS 컴플렉스들이 기준 QRS 컴플렉스와 같은 부류에 속하는지 아닌지를 결정하기 위하여 하나 또는 그 이상의 유사 척도(similarity measure)들을 사용한다. 그러나 파라미터의 선택은 또 다른 문제점을 야기한다. 즉 QRS 컴플렉스의 정렬(alignment) 문제인데, 만약 파라미터로서 신호의 1차 미분값의 최대 진폭과 최소 진폭만을 사용하거나, 극점의 위치에 대한 상대적인 파라미터만을 사용할 경우는 정렬은 필요 없을것이다. 그러나 QRS 컴플렉스에 대한 진폭 시퀀스들을 파라미터로 취하는 경우는 정렬 과정이 필요하다. 일부 알고리즘에서는 유사척도를 기준 QRS 컴플렉스의 상대적 위치에 대한 비교될 QRS 컴플렉스의 상대적인 위치를 이동 시킴으로서 극대화하기도 한다. QRS 컴플렉스가 한가지 종류 이상이 존재할 때 어떤 QRS 컴플렉스가 지배 형태(dominant morphology)인지를 결정해야한다. 지배 타입은 반드시 가장 많이 나타내는 타입만으로 결정해서는 안된다. 심실성 이단현상(ventricular bigeminy)의 경우 첫번째와 맨 나중의 QRS 컴플렉스는 기외수축(extrasystole)을 나타내는 경우, 정상적인 QRS 컴플렉스는 비 정상 비트보다 적게 나타난다. 따라서 상실성(supraventricular)을 갖는 리드에서의 지배적인 타입을 결정할 때는 좀 더 정교한 알고리즘이 필요하다⁽³⁾. 본 논문은 QRS 컴플렉스의 특성표시 과정을 컴플렉스 조정과정, 컴플렉스 라벨링, 그리

고 우세 타입의 결정 과정으로 나누어 설명한다. 또한 심전도 신호처리에 있어서 전처리 과정의 목적은 각종 잡음 성분 검출 및 제거를 통한 신호의 질적 개선에 있다. 이와 같은 잡음 성분으로는 근 잡음, 60Hz 전원 잡음, 그리고 기저선 동요로 크게 나눌 수 있다. 그리고 진단 파라미터 추출 과정에서도 개별적인 리드에 대하여 각각의 특성점(P파, QRS 컴플렉스, 및 T파)에 대한 파라미터를 구한 후 각 파라미터들의 평균값을 진단 파라미터로 사용하는 방법과 같은 형태를 갖는 QRS 컴플렉스에 대한 대표 비트 즉, 평균화 과정을 거쳐 구한 대표 PQRST 컴플렉스를 구한 다음, 이 대표 컴플렉스에서 진단 파라미터를 추출하는 방법이 있다. 후자는 신호의 SNR을 높혀 잡음 성분, 특히 고주파 잡음 성분의 영향을 적게 받기 때문에 정확한 진단 파라미터를 추출할 수 있다.

그러나 평균화 과정을 거쳐 구한 대표 비트의 ST-T 세그먼트에서는 왜곡 현상이 발생된다. 이와 같은 왜곡 현상은 ST-T 세그먼트의 주파수 성분이 기저선 동요의 주파수 성분과 같이 저주파 특성을 나타내기 때문에 주로 기저선 동요 제거 과정에서 발생된다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 즉, 기저선 동요 제거 알고리즘의 불완전성 과 기저선에 국부적 탈선 현상(급작성 기저선 동요)이 있는 경우에 주로 왜곡 현상이 일어난다. 이와 같은 왜곡 현상이 발생되는 ST 세그먼트를 대표 비트를 구하는데 사용될 경우 대표 컴플렉스의 T파 성분은 원래의 성분 값과는 다른 결과를 얻게 될 것이다. 따라서 ST-T 세그먼트에 왜곡 현상이 발생되는 세그먼트를 포함하는 PQRST 컴플렉스는 대표 비트를 구하기 위한 평균화 과정에서 제외시켜야 한다. 본 논문은 ST-T 세그먼트 진폭 집합에 대한 분포 성질을 이용하여 ST-T 세그먼트 특성 표시 방법을 제안하였다. ST-T 세그먼트 특성 표시 과정은 일종의 잡음 성분 검출 과정으로 생각할 수 있기 때문에 양적인 비교 평가는 어렵다. 따라서 가시적으로 확인할 수 있는 질적 성능 평가 방법을 사용하였다.

QRS 컴플렉스 특성 표시

QRS 컴플렉스 조정과정

QRS 컴플렉스 조정 과정은 기준점 결정과정으로

서 일부 논문에서는 조정 과정 보다는 기준점 결정이라는 용어를 사용하기도 한다. 또한 다른 논문들에서는 QRS 컴플렉스 검출 과정에서 결정되며 대부분은 R파를 기준점으로 선택한다. 그러나 사실 R를 기준점으로 설정하기 위해서는 각 QRS 컴플렉스의 특성점(Q파, R파, 및 S파)에 대한 결정 과정이 포함되어야 한다. 대역통과 필터를 거친 QRS 컴플렉스의 기준점(reference point) 서로 일치하면 최대 관계상관값을 갖는다. 따라서 기준점의 선택은 QRS 컴플렉스의 특성표시 과정에서 아주 중요한 부분이다. 그러나 자동 진단 장치와 같이 멀티리드 입력을 동시에 받아 처리하는 시스템에서는 각 그룹에 대하여 신호처리를 수행하기 때문에, 기준점 그 자체 뿐만 아니라 기준점이 결정되는 리드의 선택 또한 필요하다. 따라서 기준점을 명확히 결정할 수 있는 리드의 선택은 컴플렉스 조정과정 중에 포함 되어야한다. 본 논문은 기준점과 기준점 결정을 위한 리드의 선택을 위하여 3가지 연구방법이 연구되었다⁽⁶⁾⁽⁷⁾(그림 1). 이 과정에서 사용되는 대역통과 필터의 특성은 그림 2와 같다.

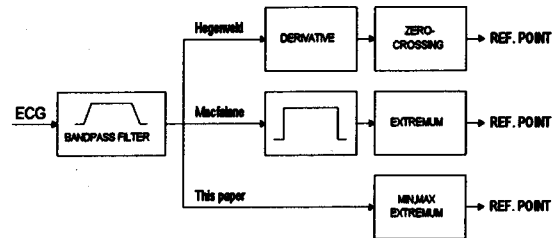


그림 1 연구된 3가지 기준점

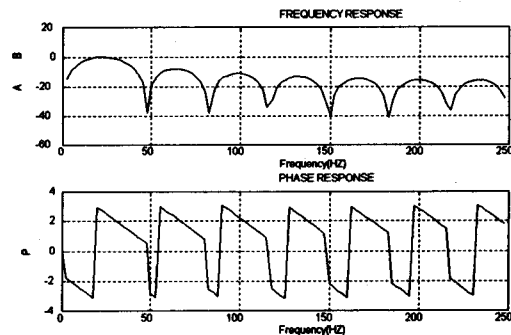


그림 2 리드선택과 QRS 특성표시과정에서 사용된 대역통과필터의 주파수 및 위상 특성

QRS 컴플렉스 라벨링

각 컴플렉스에 대한 라벨링을 수행하기 위해서는 특성 벡터들이 필요하다. 최적의 특성 벡터를 찾으

먼 그 후 과정, 즉 클러스터링(clustering) 및 분류(classification)과정은 쉬워지고, 반대로 최적의 특성 벡터를 찾을 수 없다면 클러스터링에 의해 최적의 특징 벡터를 찾아야만 한다. QRS 컴플렉스 라벨링을 위한 제시된 5개의 대표적인 특징 파라미터들은 다음과 같다.

- ㉠ 2개 QRS 컴플렉스의 연속적인 10개의 진폭집합들에 대한 상관관계(Correlation)
- ㉡ 10개의 진폭집합에 대한 파워 비(Power Ratio)
- ㉢ 원신호 최대 진폭대 진폭비 (Ratio of Peak to Peak)
- ㉣ 각 QRS 컴플렉스에 대한 상대적인 진폭대 진폭비
- ㉤ 각 QRS 컴플렉스에 대한 상대적인 진폭의 최대 및 최소값

그러나 QRS 컴플렉스가 작은 진폭을 갖는 리드의 경우, QRS 컴플렉스가 같은 시퀀스로 동작되는 상황에서도, 미소한 심장의 위치 변화에 의해 파형의 형태가 크게 다르게 나타나게 되는 경우가 발생된다. 이와같은 문제를 해결하기 위하여, 상대적인 진폭값을 파라미터로 하여 리드의 순서를 결정하는 방법이 제안되었다⁽⁸⁾. 이와같이 잘못 분류된 결과는 선택된 특징벡터의 최적성 문제와 NPPA 가 갖는 구조적 단점, 즉 이진 논리를 바탕으로 한 결정론적 방법 때문에 발생한다. 이와같은 이진 구조를 바탕으로 한 결정론적 분류 방법에서는 같은 파형이지만 약간의 형태(morphology)변화가 있는 경우, 일부는 같은 파형으로, 일부는 다른 파형으로 분류되는 결과가 나온다. 이와같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문은 라벨링을 위한 새로운 특징벡터와 fuzzy c-means(FCM)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 알고리즘을 이용한 퍼지 분류기를 제안한다. 본 논문에서 제안된 특징벡터는 식 (1)과 같다.

$$SF 1 = \sum_{k=1}^3 (1 - Cor(k)) Ramp(k) \quad (1)$$

$$SF 2 = \sum_{k=1}^3 (1 - Pow(k)) Ramp(k)$$

제안된 특징벡터의 유용성에 대한 논리적 근거는 작은 관계상관치와 파워비를 갖는 리드에서도 유사한 컴플렉스쌍을 분류할 수 있다는 것이다. 즉 작은 관계상관치와 파워비를 갖는 리드에서도 (1-Cor(k))과 (1-Pow(k))는 비교적 큰값을 갖지만, Ramp(k)는 작은 값을 가지므로, 결과적으로 관계상관치와 파워비의 감소비에 대한 보상이 이루어진다. 또한 이와같은 특징벡터를 축으로 하는 2차원

특징공간(SF1 x SF2)에서 각각의 특징 벡터들에 대한 2부류 - 유사함(similarity) 또는 상이함(Difference)에 대한 분할과정을 FCM 알고리즘을 이용하여 수행한다. 이 때 각 부류에 대한 프로토타입 값(즉, 클러스터 중심값)에 대한 멤버십 함수로 각 특징벡터가 그 부류에 속하는지 아닌지를 검사한다. 구현된 FCM 알고리즘의 의사 코드는 그림 3에 나타내었다. FCM을 이용하여 특성 공간(SF1 X SF2)에서의 각 클러스터에 대한 중앙값을 결정하기 위해서는 잘 설정된 훈련집합(training set)이 필요하다. 본 논문은 CSE 데이터 베이스 set 3중 특성 벡터 SF1 과 SF2의 순서쌍이 각각 0.05 이하인 값과 2.0을 넘는 값을 제외한 유사한 컴플렉스 220쌍과 상이한 컴플렉스 112쌍, 총332쌍을 클러스터 중앙값을 결정하기 위한 훈련 집합으로 사용하였다. 0.05 이하인 값과 2.0이상인 값을 제외한 이유는 클러스터 집합의 분포정도를 최대한 집중시키기 위해서 이다. 이와같은 값을 결정하게 된 근거는 유사한 컴플렉스군에서의 평균과 표준편차는 각각 0.1523과 0.0995 이고 상이한 컴플렉스 군에 대한 평균과 표준편차는 각 1.249과 0.550라는 사실을 바탕으로 설정하였다.

Define U : fuzzy c-partition ($\mu_{ik} \in [0,1] \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1$)

z : cluster center ($z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_c) \in R^{cp}$)

$d_{ik}^2 = \|x_k - z_i\|^2$

$\|\cdot\|$: inner product norm

m : fuzzy exponent ($m \in (1, \infty)$)

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}}\right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

$$z_i = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^m}, \forall i$$

Begin

Fix $c, 2 \leq c < n$;

Choose any inner product norm metric for R^P ;

Fix $m, 1 \leq m < \infty$; Initialize U ;

for $l := 0$ step 1 until maxiter - 1 do begin

calculate the c cluster centers $\{z_j\}$ with z_j and U ;

Using μ_{ik} and $\{z_j\}$ obtain U_{NEW} ;

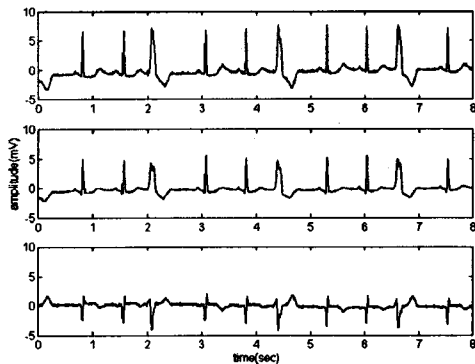
if $\|U_{NEW} - U\|_{\infty} \leq \epsilon$ then stop;

end

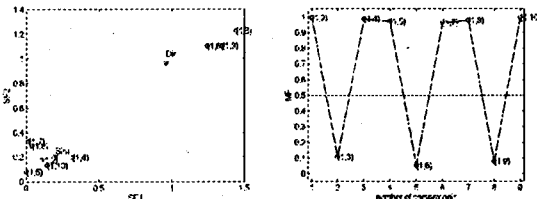
end

그림 3 FCM(fuzzy c-means)알고리즘의 의사코드

각 컴플렉스쌍에 대한 SF1과SF2를 구하여 두개의 클래스에 대한 확신도, 즉 멤버십 함수(MF)를 결정하여, 이 컴플렉스 쌍이 같은지 또는 다른지를 결정하게 된다. 그림 4는 첫번째 QRS 컴플렉스를 기준 컴플렉스로 하여 다른 컴플렉스들에 대한 라벨링 과정을 나타낸 그림이다. 그림 (a)는 입력된 심전도 리드 그룹을 나타내며, 그림 (b)는 첫번째 컴플렉스를 기준으로 결정된 특성벡터 SF1과SF2를 나타낸 분포도이다. 여기서 (1,i)는 첫번째 컴플렉스와 i 번째 컴플렉스를 나타내며, *(Sim) 과 *(Dif)는 위의 혼련집합을 통하여 결정된 클러스터 중앙값을 나타낸 것이다. 그림 (c)는 각 컴플렉스 쌍에 대한 유사정도를 나타내는 멤버십 함수이다.



(a)



(b)

(c)

그림 4 QRS 컴플렉스쌍에 대한 라벨링 과정 (a) 입력된 심전도 신호 리드 그룹 (b) SF1과 SF2의 분포도 (c) 각 컴플렉스 쌍에 대한 멤버십 함수

ST-T 세그먼트 특성표시

ST-T 세그먼트 진폭 집합 결정 과정

우선 QRS 컴플렉스에 대한 검출 및 특성 표시 과정을 이용하여 대략적인 QRS 컴플렉스 시작점, 끝점과 지배적인 QRS 컴플렉스를(dominant QRS complex) 결정한다. 또한 특성 표시 과정 전에 기저선 동요 검출 과정을 이용하여 기저선 동요의 유,무를 결정한다. 기저선 동요가 있는 것으로 판정되면, 기저선 동요 제거 알고리즘(CS_PQ & TP)

을 적용한다. 이때 ST-T 특성 표시 과정에서 고주파 잡음 성분은 대표 PQRST 컴플렉스를 결정하기 위한 평균화 과정을 통하여 감소되므로 큰 문제가 되지 않는다. 지배적인 QRS 컴플렉스의 끝점에서 10ms 후 부터 T파 끝점까지 20ms 간격으로 일정하게 원 신호에 대한 진폭 집합을 결정한다. 이때 T파 끝점의 위치는 식 (2)을 이용하여 구한다. 그림 5는 결정된 진폭 집합을 나타낸 그림이다. 점선은 대략적으로 결정된 QRS 컴플렉스의 시작점과 끝점을 나타내며, 대시(dash)선은 결정된 진폭 집합을 나타낸다. 위 그림에서 5번째 ST-T 세그먼트에서 편이가 발생되었음을 쉽게 확인할 수 있다.

$$QT(ms) = 250 + RR_{median}/5 \tag{2}$$

심방성 또는 심실성 기외수축이 있는 파형의 경우, 기외수축 바로 전에 위치한 지배 QRS 컴플렉스의 T파는 기외수축이 발생한 QRS 컴플렉스의 앞부분 일부와 중첩 되는 경우가 발생된다. 이와같은 지배 QRS 컴플렉스에 대한 ST-T 세그먼트는 대표 컴플렉스를 구하기 위한 평균화 과정에서 제외되어야 한다. 따라서 효율적인 ST-T 세그먼트 특성 표시 과정을 수행하기 위하여, 지배적인 QRS 컴플렉스와 연속되는 다음 QRS 컴플렉스와의 RR 간격을 조사한다. 이때 비교적 짧은 RR 간격을 갖는 경우, 이 컴플렉스에 대한 ST-T 세그먼트는 특성표시 과정에서 제외시킨다. 이 때 짧은 RR 간격의 선택 기준은 다음 두 가지 중 작은 값을 선택한다.

1. 600ms
 2. RR 간격들의 중간값(median value) -100ms
- 위와같은 진폭집합 결정과정은 모든 리드에 대하여 각각 적용한다.

편이(outlier)가 있는 ST-T 세그먼트 검출

ST-T 세그먼트에 대한 편이(outlier) 발생을 자동으로 검출하기 위하여 본 논문은 각 세그먼트의 진폭집합에 대한 분포 특성을 이용하였다. 이때 각 ST-T 세그먼트에 대한 진폭집합은 식 (3)와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n-1} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n-1} & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{k-1,1} & x_{k-1,2} & \dots & x_{k-1,n-1} & x_{k-1,n} \\ x_{k,1} & x_{k,2} & \dots & x_{k,n-1} & x_{k,n} \end{bmatrix} \tag{3}$$

심전도 자동진단 알고리즘 및 장치구현(IV)

여기서 k 는 결정되는 진폭 집합에 대응하는 ST-T 세그먼트의 순차적인 순서를 나타낸 것이며, n 은 ST-T 특성 표시 과정에서 결정되는 진폭 집합의 갯수를 나타낸 것이다. 이와 같은 행렬식을 이용하여 각 ST-T 세그먼트 진폭 집합에 대한 편이 값을 계산한다. 이때 최대 편이(outlier)는 식(4)와 같이 구한다.

$$\text{maximum outlier} = \max \left(\frac{\text{abs}(x_{\text{col}} - \text{mean}(x_{\text{col}}))}{\text{standard deviation}(x_{\text{col}})} \right) \quad (4)$$

여기서 x_{col} 식(5.2.2)에서 구한 행렬의 열 벡터이다.

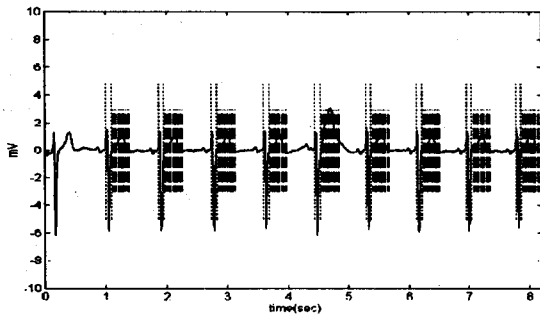


그림 5 ST-T 특성표시 과정을 위한 진폭 집합 결정 과정

결론

퍼지 클러스터링을 이용한 QRS 컴플렉스 특성 표시 과정을 제안 함으로서 진단 파라미터 결정을 위한 대표 비트 선택 및 효율적인 리듬 분석이 가능도록 하였다. 이진 논리를 바탕으로한 분류 방법의 문제점을 해결하고 효율적인 클러스터링을 위한 새로운 특성 벡터를 이용 함으로서 개선된 분류 결과를 얻을 수 있었을 뿐만아니라 분류 노드수를 대폭적으로 줄일 수 있었다. 또한 ST 세그먼트 특성 표시 과정을 이용하여 편이가 발생하는 ST-T 세그먼트는 대표 비트를 구하기 위한 평균화 과정에서 제외 시킴으로써 정확한 대표 비트를 구할 수 있었다.

참고문헌

[1]S. Barro, R. Ruiz, and J.Mria, " Fuzzy beat labelling for intelligent arrhythmia monitoring",Comp. Biomed.

Res.,vol 23, pp.240-58,1990

[2]P.W Macfalane, B. Deine, S.Latif, M.P. Watts,"Methodology of ECG interpretation in the Glasgow program", Meth. Inform. Med.,vol 29, pp.354-361,1990

[3]Q.L. Cheng, H.S. Lee, N.V. Thakor,"ECG waveform analysis by significant point extraction:Pattern Matching",Comp. Biomed. Res.,vlo 20, 428-442,1987

[4] H.J Kweon, J.W.Suk, and M.H Lee,"Intelligent QRS typification using Fuzzy clustering algorithm" Proceedings of 16th International Conference on EMBS, IEEE, vol. 17, no.1, pp.760-761, Montreal, Canada, 1995

[5]S.J. Hengeveld, J.H Van Bommel,"Clustering Algorithm for QRS and ST-T waveform typing",Comp. Biomed. Res.,vol 6, 442-456,1973

[6]J.A Kors, J.L Talmon," Multilead ECG analysis",Comp. Biomed. Res.,Vol 19, pp.28-46,1986

[7]J.A Kors, G. Herpen,J.L Willems,"Variability in the ECG computer interpretation:Analysis of individual complexes vs analysis of a representative complex",vol. 70, 96-99,1992

[8]권혁제,공인옥, 이명호, " 클러스터링 알고리즘을 이용한 QRS 컴플렉스 특성 표시에 관한 연구", 대한전자공학회 하계학술대회 논문집, vol. 17(1), pp 680 -694,1995

[9]J.C Bezdek, R. Ehrlich, and W. Full. "FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm,"Computer & Geosciences, vol 10,pp191-203,1984

[10]J.C. Bezdek , P.K. Sanker, "Fuzzy models for pattern recognition: Methods that search for structure in data, new york, 1992,IEEE Press