DBpia

형태적 특징 정보를 이용한 C.Elegans의 개체 분류

준회원 전 미 라*, 나 원* 정회원 홍 승 범*, 백 중 환*

Classification of C.elegans Behavioral Phenotypes Using Shape Information

Mi-Ra Jeon, Won Nah, *Associate Member*
Seung-Bum Hong, Joong-Hwan Baek *Regular Members*

요 약

C.elegans 선충은 유전자 기능 연구에 주로 쓰이고 있으나, 변종들의 구분이 육안으로는 쉽지 않다. 이를 해결하기 위하여 컴퓨터 비전을 이용하여 자동으로 분류할 수 있는 시스템이 연구 중이며, 이전 논문[1]에서 선충의 자동 분류 시스템에 사용될 영상의 전처리 과정에 대하여 서술한 바 있다. 본 논문에서는 전처리 된 영상 데이터를 이용하여 추출해 낼 수 있는 선충의 형태적 특징들을 제시한다. 선충의 크기와 관련한 특징과 자세에 관련한 특징으로 나누어, 각 특징의 추출 알고리즘을 수학적으로 표현하였다. 실험에서 제시된 형태적 특징 정보를 이용하여 직접 분류해 봄으로써 성능을 확인하였다. 분류 알고리즘은 Hierarchical Clustering을 사용하였다. 그 결과 실험에 이용된 선충의 4 종류 모두 90% 이상 옳게 분류되었다.

Key Words : Shot change detection, Multiple features, Classification

ABSTRACT

C.elegans are often used to study of function of gene, but it is difficult for human observation to distinguish the mutants of C.elegans. To solve this problem, the system, which can classify the mutant types automatically using the computer vision, is now studying. In previous work[1], we described the preprocessing method for automated-classification system. In this paper, we introduce shape features, which can be extracted from an acquisition image. We divide the feature into two categories, which are related to size and posture of the worm, and each feature is described mathematically. We validate the shape information experimentally. And we use hierarchical clustering algorithm for classification. It reveals that 4 mutants of the worm, which are used in experiment, can be classified with over 90% of success rate.

Ⅰ. 서 론

유전자의 기능을 연구하는 신경과학 분야에서는 주로 생물 모델을 사용하여 그 역할을 분석하고 있다. 이러한 생물 모델 중 하나가 C.elegans이다.

C.elegans는 흙에서 박테리아를 먹고 사는 선충으로서 성체의 크기는 1mm정도이고 비교적 단순한 형태를 지닌 다세포 생물이다. 다리와 눈, 체절이 없으며 몸이 투명하고 머리나 꼬리에 있는 감각기관을 통해서 외부 환경을 파악한다. 알에서 부화된 뒤 4단계의 탈피과정을 거쳐 선충이 되는데 약 3일이 소요되며, 평균수명이 2~3주 정도로 발생 단계가 비교

* 한국항공대학교 정보통신과 컴퓨터비전 및 영상처리 연구실(jhbaek@mail.hangkong.ac.kr)
논문번호 : 030107-0315, 접수일자 : 2003년 3월 15일
※본 연구는 과학기술부·한국과학재단지정 「한국항공대학교 인터넷정보검색연구센터」의 연구비 지원으로 수행되었음.

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

적 단순하다. 뿐만 아니라 수정란에서 성체에 이르기까지 세포 분열 양상이 각 개체마다 동일하고, 배양과 보관이 쉽다. 또한 알과 정자가 모두 같은 유전형을 지니기 때문에 자손들이 모두 부모세대와 같은 유전형을 갖기 때문에 돌연변이 개체를 번식시키기도 쉽다는 점에서 각 종 연구의 생물 모델로 많이 활용되고 있다. 특히, 간단한 신경세포를 갖고 있다는 점에서 유전학 연구에 주로 이용되고 있다.

선충의 전체 세포 수는 959개로 이 중 302개가 신경세포이며, 고등동물의 세포를 구성하는 분자적 구조물들 대부분이 존재한다고 한다. 선충의 유전자를 연구한 genome project의 결과로 선충의 염기서열은 인간 유전자의 1/3~1/5 수준인, 유전자 19099개로 된 9천7백만개의 DNA 염기쌍으로 이루어져 있음이 밝혀졌다. 이 유전자들 중 40%가 인간의 것과 닮았으며 지금까지 알려진 인간 유전자 5,000개 가운데 75%를 공유하고 있어 암/알츠하이머 등 질병과 노화, 세포간 상호관계 등의 연구에 사용되고 있다. 더욱이 인간의 유전자 지도가 완성된다 하더라도 인간을 실험 대상으로 할 수 없다는 점에서 C.elegans의 연구분석이 절실히 요구되고 있다. 선충을 대상으로 하는 연구들은 주로 선충의 유전자 중 하나를 파괴하여 얻어진 돌연변이 개체에 일어나는 변화를 살펴서 인간 유전자의 기능을 추측하는 방식으로 진행되고 있다. 현재 노화 조절(daf-2, daf-16), 노화 억제(mev-1) 등의 유전자 역할이 밝혀졌고, 이외 난치병 치료를 위한 유전자 등이 계속 연구되고 있다.[2][3][4]

이러한 연구 진행에 발 맞추어 자연형(wild-type)과 돌연변이 개체를 자동으로 구분할 수 있는 시스템의 개발이 요구되고 있다. 이에 관련된 기존의 논문으로 선충의 자동 추적 시스템[5]과 선충이 알을 낳는 시간 데이터를 포아송 분포를 이용하여 모델링 한 것[6] 등이 있다.

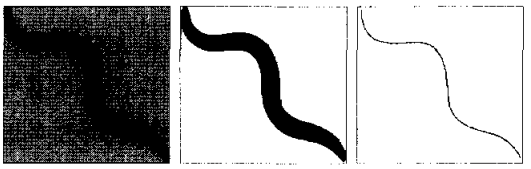
본 논문에서는 여러 선충들을 오랜 시간 촬영하여 얻어진 영상 데이터를 분석하여 얻어진 특징들을 이용하여 각각의 종류를 구분하는 것을 목표로 한다. 이때 사용되는 특징들은 이진화 된 영상에서 추출하게 된다. 이에 따라서 이진화와 그를 이용한 세선화의 정확성이 자동 분류의 성능에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 앞서 말했듯이 선충은 투명한 몸을 갖고 있고, 가끔 알을 낳거나 몸을 꼬는 등의 특별한 행동들을 보이므로 임계값(threshold)을 이용한 단순한 이진화는 특징들을 추출하는데 오류를 야기할 수 있다. 이런 잘못된 특징들을 사용하게 되면 정확한 분류가 불가능하게 되는 치명적인 결과를 얻을 수 있다. 이를 해결하기 위해서 기본적인 이진화와 세선화 과정에 몇 가지 수정 작업들이 필요하다.

본 논문에서는 C.elegans 선충들의 영상을 이진 처리 한 뒤 그를 통해 얻을 수 있는 선충의 형태적 특징들과 그 추출과정을 설명한다. 다음으로 얻어진 특징들을 이용하여 분류하기 위해 사용할 Hierarchical Clustering에 대하여 간단히 설명한다. 마지막으로 얻어진 특징들과 제시된 분류 기법을 이용한 C.elegans 선충들의 분류 결과를 분석하고 결론을 맺는다.

Ⅱ. 형태적 특징 추출

실험 데이터는 각 선충마다 초당 2 프레임씩 5분간 촬영한 그레이 영상이다. 특징 추출을 위해 모든 데이터를 이진화고, 세선 작업하여 특징 추출에 이용할 수 있도록 처리하였다.

이진화의 임계값은 5×5 윈도우 내 픽셀들의 평균 명도와 표준 편차를 사용하였다. 실험적으로, 평균 명도가 배경 명도의 70% 이하일 경우 선충의 몸으로 인정하였다. 더불어 반사광에 의해 실제 선충의 몸보다 밝게 처리된 영역을 고려하여, 표준 편차가 평균 명도의 30% 이상일 경우도 선충의 몸으로 인정하였다. 이진화 후 홀(hole)로 처리된 반사영역과 잡음 객체로 남은 알을 제거하기 위해서 형태 처리(morphology) 작업 중 채움(closing)작업과 labeling작업을 추가로 수행하였다. 얻어진 이진 영상은 Zhang & Suen의 병렬 세선화 알고리즘을 이용하여 세선화하였다.



(a) (b) (c)

그림 1. (a)선충의 원 영상, (b)전처리 과정을 통한 이진 영상, (c)세선 영상

추가로 세선 영상이 최소한의 픽셀만을 갖도록 불필요하게 연결된 픽셀들을 제거하는 작업과 잡음 가지를 제거하기 위한 pruning작업을 수행하였다.[1][7][8]

이진 영상과 세선 영상을 통해서 얻을 수 있는 형태적 특징은 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 단순히 크기에 관련된 특징이고 다른 하나는 자세에 관련된 특징이다. 선충의 크기 면으로는 선충의 면

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

적, 길이, 굵기와 비만도를 정의한다. 자세 쪽으로는 최적타원(best-fit-ellipse)와 각도변화율(angle change rate), MER(minimum enclosing rectangular)과 진폭 비율(ampli tude ratio)을 정의한다.

1. 선충의 크기와 관련한 형태 특징

전처리 된 영상 데이터를 이용할 때 가장 손쉽게 구할 수 있는 형태 특징이 바로 면적과 길이이다[9]. 선충의 면적 (A)은 이진 영상에서 1값을 갖는 픽셀의 수이다. 실험 영상의 크기가 $N \times M$이고, 이진화 된 영상의 픽셀 값을 $b(x, y)$라고 하면, 면적은 식 (1)과 같다.

$$A = \sum_{x=1}^{N} \sum_{y=1}^{M} b(x, y) \tag{1}$$

마찬가지로 선충의 길이 (L)는 세선 영상에서 1 값을 갖는 픽셀의 수와 같다. 세선화 된 영상의 픽셀 값을 $S(x, y)$라 하면, 길이는 아래 식 (2)가 된다.

$$L = \sum_{x=1}^{N} \sum_{y=1}^{M} s(x, y) \tag{2}$$

두 특징이 구해지면, 간단하게 (A/L)로 선충의 비만도(fatness)를 구할 수 있다. 선충의 굵기는 머리/꼬리 부분과 중심 부분으로 구분해서 계산한다. 먼저 중심 부분은 $L/2$이 되는 곳을 기준점으로 한다. 몸통을 가로 지르는 선의 기울기를 구하기 위해서, 기준점의 좌표와 전후 4픽셀의 좌표를 조사한다. 굴곡진 선충의 몸에 가장 잘 맞는 선을 찾기 위해서 아홉 픽셀의 분산과 공분산을 조사한다. 기준점 좌표를 $s(x_c, y_c)$라 하고 이것을 평균으로 9픽셀의 분산과 공분산은 각각 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{9} \sum_{x=1}^{9} (x_i - x_c)^2 \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{9} (y_i - y_c)^2 \\ \sigma_{xy} &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{9} (x_i - x_c)(y_i - y_c) \end{aligned} \tag{3}$$

이 값들을 이용해서 9픽셀의 기울기 θ를 구하면, 아래와 같이 표현된다.

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{2} \times \tan^{-1}\left(\frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}\right) \tag{4}$$

선충의 굵기는 그림2 (b)에서 보여지듯이 기울기 θ에 대하여 중심을 수직으로 지나는 선과 그 선에서 ±5° 씩 기울어진 직선의 길이를 조사한다. 직선과 만나는 객체 테두리(boundary)의 좌표를 각각 (x_1, y_1) , (x_2, y_2)라고 하면, 굵기 (T)는 Euclidean 방식으로 계산된다.

$$T = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{5}$$

세 직선 중 길이가 가장 긴 것을 선충의 두께로 정한다. 중심부분과 마찬가지로 머리/꼬리 부분도 기준점과 전후 4 픽셀씩 총 9 픽셀의 기울기를 계산하여 얻어진 수직선과 ±5° 기울어진 직선의 길이를 조사하여 를 계산한다. 단, 평균이 되는 기준점 좌표는 머리 또는 꼬리의 양 끝에서 일곱 번째 위치한 픽셀의 좌표로 한다.

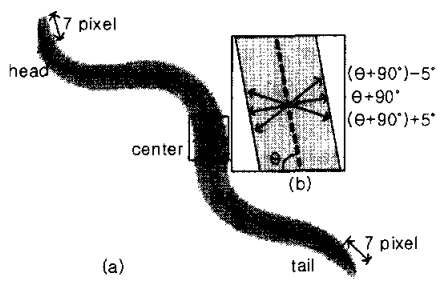


그림 2. 세선 영상을 이용한 선충의 두께 구하기 (a) 머리/꼬리와 중심의 두께 측정 부위, (b) 기울기

2. 선충의 자세와 관련한 형태 특징

선충들이 종류마다 운동성이 다르다는 점에서 착안하여, 움직일 때마다 변하는 몸의 형태 특징을 조사한다. 우선, 그림3 (a)처럼 선충의 최적 타원(best-fit-ellipse)을 찾으면, 타원의 장축과 단축, 이심률을 새로운 특징 값으로 사용할 수 있다. 장축과 단축은 선충의 이진 영상 좌표들의 분산을 이용하여 얻을

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

수 있다. 선충의 무게 중심 좌표를 $(\overline{x}, \overline{y})$라고 하면, 그 값은 식 (6)과 같이 표현된다. A는 앞 절에서 계산한 선충의 면적이다.

$$\overline{x} = \frac{\sum_{x=1}^{N}\sum_{y=1}^{M} xb(x,y)}{A} \qquad (6)$$
$$\overline{y} = \frac{\sum_{x=1}^{N}\sum_{y=1}^{M} yb(x,y)}{A}$$

이 좌표 값을 평균으로 놓고 σ_x^2와 σ_y^2, σ_{xy}값을 구하면, 최적 타원의 장축(m)과 단축(n)길이는 다음과 같이 표현 할 수 있다

$$m = 2\sqrt{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c)}$$
$$n = 2\sqrt{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - c)} \qquad (7)$$
$$c = \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) + 4\sigma_{xy}}$$

이 때, 이심률(eccentricity)은 식(8)이 된다.

$$e = \frac{\sqrt{m^2 - n^2}}{m} \qquad (8)$$

선충의 최적 타원이 찾아지면, 그림 3에서 보여지는 것과 같이 MER(Minimum enclosing rectangle)을 구할 수 있다.

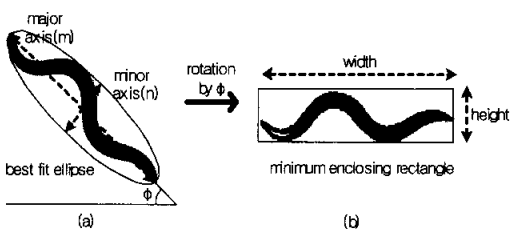


그림 3. (a)선충의 최적 타원의 장축(m)과 단축(n), (b)기울기 회전에 의한 MER

MER은 타원의 장축이 기준선에 대하여 기울어진 만큼 선충을 회전시켜 얻은 영상의 최소 크기를 말한다. 우선 장축의 기울기를 구한다. 방법은 이전에 선충의 굵기를 구할 때 골격의 기울기를 구하던 방식과 같다. 기준선에 평행하게 배치된 선충 영상에 대하여 최소 높이와 너비를 계산한다. MER에 대한 특징값은 최소 높이 대 너비의 비, - - 을 사용한다.

각도 변화율(Angle change ratio)는 선충 골격선의 기울기가 변화하는 정도에 대한 수치이다. 전체 골격선을 10픽셀씩 나누어서 각각의 기울기를 계산한 뒤, 이전 기울기와의 차이를 얻는다. i번째 기울기를 각 A_i로 표현할 때, 세선 영상 $s(x,y)$를 이용한 계산식은 다음과 같다.

$$A_i = \frac{180^\circ}{\pi} \times \tan^{-1}\left(\frac{x_{10(i+1)} - x_{10i}}{y_{10(i+1)} - y_{10i}}\right) \qquad (9)$$
$$, \quad 0 \le i < \frac{L}{10} - 1$$

이 때, 전후 각들 사이의 차이 D_i는 아래와 같이 계산된다.

$$D_i = \begin{cases} |A_i - A_{i-1}|, & 0 \le |A_i - A_{i-1}| \le 180^\circ \\ 360 - |A_i - A_{i-1}|, & 180^\circ < |A_i - A_{i-1}| \le 360^\circ \end{cases}$$
$$, \text{ for } \quad 1 \le i < \frac{L}{10} - 1 \qquad (10)$$

최종 선충의 분류 작업에 사용할 각도 변화율은 위 식을 이용해서 얻어진 차이 값들의 평균을 이용한다. 평균($mean_{ACR}$)은 식 (11)로 정리된다. 여기서 I는 전체 차이 값들의 개수이다.

$$mean_{ACR} = \frac{1}{I}\sum_{i=0}^{I-1} D_i \qquad (11)$$

마지막으로 선충의 움직임에 의해 생긴 굴곡의 진폭 비율(amplitude ratio)을 조사한다. 진폭을 측정하기 위한 기준선은 머리와 꼬리, 끝점을 잇는 선으로 한다. 선충의 진폭은 골격선 위의 점들 중에서 기준선과의 수직 거리가 가장 먼 점까지 길이를 피크(peak)치로 한다.

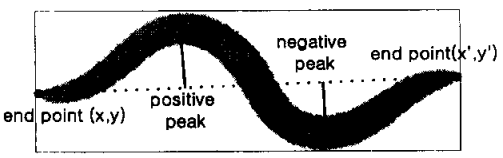


그림 4. 선충의 진폭과 비율 구하기

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

또한 그림 4에서 표현된 것처럼, 기준선에 대하여 양(positive)과 음(negative)의 두 방향에 대하여 피크 치를 조사한다. 진폭 비율은 두 피크치의 비율을 말한다. 양과 음 방향은 상대적인 위치일 뿐이므로, 진폭 비율은 항상 둘 중 큰 값이 분자가 되도록 설정하고 계산한다.

$$Amplitude\ ratio = \frac{\max(P_{peak}, N_{peak})}{\min(P_{peak}, N_{peak})} \quad (12)$$

끝점이 하나인 경우에는 끝점에서 가장 멀리 떨어진 골격의 위치를 임시 끝점으로 간주한다. 끝점이 아예 없는 경우에는 즉, 완전한 환 형태를 취한 경우에는 가장 긴 지름이 기준선이 된다. 이 때 진폭 비율은 1이 된다.

Ⅲ. 결과 및 분석

실험에는 C.elegans 선충의 자연형(wild)과 3 변종(goa-1, nic-1, egl-19)을 각각 100마리씩 5분 동안 초당 2 프레임씩 촬영한 영상 데이터를 사용하였다. 영상은 이진화와 세선화를 거친 뒤, 앞에서 제시한 바와 같이 형태 분류를 위한 특징으로 선충의 면적, 길이, 비만도, 굵기, 최적타원, MER, 각도 변화율, 진폭 비율을 계산하였고, 선충의 크기와 움직임의 연관성을 조사하고자 길이와 이심률의 비율을 추가 조사하였다. 선충마다 600(5분×60초×2Hz)개의 프레임 별로 특징 값을 계산하였고, 선충의 대표값은 극단적인 에러를 피하기 위해서 600개의 특징값 중 최상위 10%와 최하위 10%를 제거한 480개의 평균을 취하였다. 이렇게 구해진 400마리 선충의 12개 특징들을 선충의 종류별로 정리한 평균 값이 아래 표1과 같이 나타났다.

표 1. 선충의 종류별 특징들의 평균 비교

Feature		Wild	Goa-1	Nic-1	Egl-19
Area		6957.63	5304.14	4919.88	7040.4
Length		287.48	238.24	209.58	317.78
Fatness		24.21	22.24	23.45	22.15
Thick-ness	Center	23.35	20.56	23.09	22.43
	Head /Tail	0.0272	0.0319	0.0398	0.0239
Best-fit ellipse	Major axis	300.82	234.73	213.92	313.85
	Minor axis	65.41	69.85	52.34	79.53
	Eccen-tricity	0.9737	0.9472	0.9563	0.9564
Ratio of length to eccentricity		296.23	252.62	220.47	333.39
Width to height for MER		3.9602	3.0225	3.5583	3.5872
Angle change rate		3.386	5.462	5.901	2.961
Amplitude ratio		0.2749	0.3708	0.1788	0.2684

표 1의 수치들을 비교해보면, 자연형은 변종들에 비해 뚱뚱하고, 움직임에 의한 몸의 굴곡은 완만하다. egl-19은 네 종류 중 가장 크고 길며, nic-1은 egl-19 크기의 2/3정도인 것으로 나타나고 있다. goa-1은 egl-19과 함께 날씬한 몸체를 갖고 있으며 특히, 중심굵기가 가장 작은 것으로 나타났다. 여러 가지 형태적 특징들 중 면적과 길이만을 사용하여 네 종류 선충의 분포를 나타낸 결과가 그림 5이다. 각 값들은 최대값 1부터 최소값 -1까지의 범위 내로 정규화된 값들이다. 주로 1사분면에 자연형과 egl-19이 있고, nic-1과 goa-1은 3사분면에 분포되어 있음을 볼 수 있다. 네 종류 모두 서로 일정부분 뒤섞인 분포를 나타내고 있어서 1차 선형식으로는 분류할 수가 없다. 즉, 두 개의 특징값 만으로는 선충의 분류가 쉽지 않음을 알 수 있다. 이에, 본 논문에서는 선충의 자동 분류에 앞에서 제시한 12개의 형태적 특징들을 모두 이용하였다.

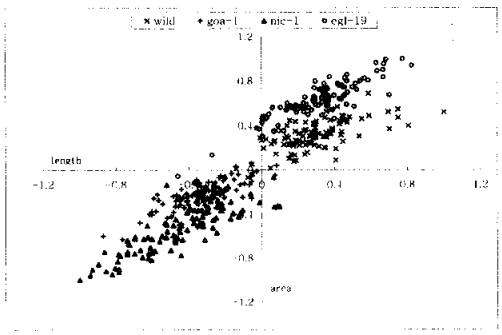


그림 5. 정규화된 면적과 길이 값을 이용한 선충의 분포

1. Hierarchical Clustering

Hierarchical Clustering[10]은 개개의 데이터들을 유사도에 따라 계층적으로 조직화한다. 작은 그룹에서

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

큰 그룹으로 묶어나가는 방식과 큰 그룹에서 작은 그룹으로 나눠나가는 방식이 있지만, 여기서는 묶어나가는 방식만을 사용한다. Hierarchical Clustering에서 유사도를 측정하는 방법으로 사용되는 것 중의 하나가 각 클러스터 간의 거리이다. 각각의 데이터들을 하나의 클러스터로 보고, 거리가 가장 가까운 클러스터들을 묶어나간다. 거리 비교 방식에는 클러스터에 속한 데이터들 중 가장 짧은 거리를 비교하는 방식 (single- linkage)과 가장 먼 거리를 비교하는 방식 (complete- linkage)이 있지만, 본 실험에서와 마찬가지로 데이터의 양이 많은 경우 극단적인 상황을 피하기 위해서 평균 거리(average-linkage)나 최소 분산법(minimum variance method)를 이용한다. 여기서는 최소 분산법을 이용하였다.

$$E = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{d} (x_{ij} - \mu_j)^2 \qquad (13)$$
$$\mu_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} x_{ij}$$

최소 분산법은 모든 클러스터 쌍 사이에서 반복을 통해 최소 자승오차(squared error)를 가지는 클러스터들을 병합해 나가는 방식이다. 클러스터 내 샘플의 특징값이 x이고, m개 샘플의 평균 특징값을 μ라고 하면, 자승오차 E는 식(13)과 같이 구할 수 있다. 여기서 d는 특징의 차수이다.

2. 분류 결과

앞에서 제시한 클러스터링 방식을 이용한 자동 분류 결과는 그림 6과 같다. 클러스터는 4개로 지정했다.

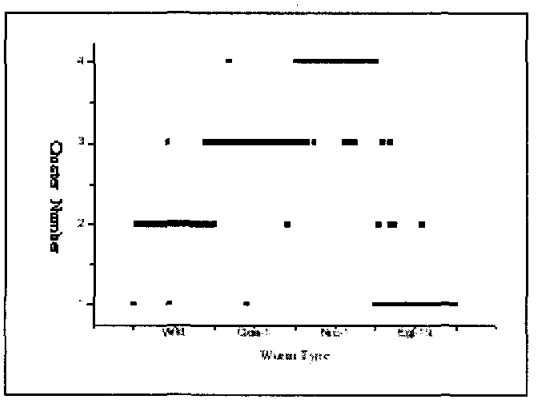


그림 6. Hierarchical 클러스터링 결과

자연형 선충의 경우 주로 클러스터 2로 분류되었고, goa-1과 egl-19는 클러스터 3과 1로, nic-1은 클러스터 4로 대부분 분류되었음을 볼 수 있다.

표 2. 실제 선충의 종류와 분류된 종류 비교

	클러스터링 결과				
		Wild	Goa-1	Nic-1	Egl-19
실제 선충 타입	Wild	92	6	0	2
	Goa-1	1	97	1	1
	Nic-1	0	9	91	0
	Egl-19	4	2	0	94

이를 좀더 정확하게 수치로 표현하면, 표2와 같다. 자연형과 변종 모두 90% 이상 정확하게 분류되었다. 이로서 본 논문에서 제시한 형태적 특징들이 선충의 자동 분류에 높은 신뢰도를 보임을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 육안으로 구분하기 어려운 C.elegans 선충들을 영상데이터를 이용하여 크기와 자세에 관련한 형태적 특징들을 추출하였고, 이를 이용하여 Hierarchical 클러스터링 기법으로 자동 분류해 본 결과 90%이상의 신뢰도를 얻을 수 있었다. 이후로는 프레임 데이터를 적극 활용하여 선충의 운동 및 이동성과 관련된 특징의 추출에 대한 알고리즘을 구상해보고, 분류의 신뢰도를 높이기 위한 결정적 특징을 가려내는데 연구의 초점을 맞출 예정이다.

참 고 문 헌

[1] 전미라, 나원, 홍승범, 백중환, "Caenorhabditis Elegans의 자동 분류를 위한 전처리", 한국신호처리시스템 학회 2002 추계 학술대회 논문집, pp. 189~192, 2002.

[2] Waggoner, L., et al.. "Control of behavioral states by serotonin in Caenorhabditis elegans", Neuron, pp. 203-214, 1998.

[3] Zhou, G.T., Schafer, W.R., Schafer, R.W. "A three- state biological point process model and its paramе -ter estimation", IEEE Trans On Signal Processing, pp. 2698-2707, 1998.

Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd. www.dbpia.co.kr

[4] Pierce-Shimomura JT, Morse TM, Lockery SR., "The fundamental role of pirouettes in Caenorhabditis elegans chemotaxis", J Neurosci , 19:9557-69, 1999.
[5] Waggoner, L., et al., "Control of behavioral states by serotonin in Caenorhabditis elegans", Neuron, pp. 203-214, 1998.
[6] Zhou, G.T., Schafer, W.R., Schafer, R.W. "A three- state biological point process model and its parameter estimation", IEEE Trans On Signal Pro- cessing, pp. 2698-2707, 1998.
[7] Jain R, Kasturi R, Schunck BG. "Machine Vision", McGraw-Hill Inc., 1995.
[8] Gonzalez R, Woods R. "Digital Image Processing", 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
[9] Luciano da Fontoura Costa, Roberto Marcondes Cesar Jr., "Shape Analysis and Classification", CRC Press, 2001.
[10] Richard O. Duda, "Pattern Classification", JOHN WILEY & Sons Inc., 2001.

전 미 라(Mi-Ra Jeon) 준회원

2002년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업
2002년 3월~현재 : 한국항공대학교 정보통신공학과 석사과정

<주관심분야> 영상처리, 패턴인식

나 원(Won Nah) 준회원

1999년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업
2002년 2월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 석사졸업
2002년 3월~현재 : 한국항공대학교 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야> 패턴인식

홍 승 범(Seung-Bum Hong) 정회원
한국통신학회논문지 제 28권 5C호 참조

백 중 환(Joong-Hwan Baek) 정회원
한국통신학회논문지 제 28권 5C호 참조

www.dbpia.co.kr
Copyright (C) 2002 Nuri Media Co., Ltd.