

움직임 각도의 주파수 분석을 통한 활동성 분석

Fish's Activity Analysis through Frequency Analysis of Angle Information

김철기
부산대학교 디자인학과

Cheol-Ki Kim(ckkim@pusan.ac.kr)

요약

본 논문에서는 기존의 컴퓨터비전 기술을 이용한 생물체의 자동 추적 시스템을 통하여 얻어진 움직임 데이터를 이용하여 일반적인 움직임의 범위를 벗어나는 비정상적인 움직임 궤적을 탐지하여 주는 방법을 제안하고 있다. 또한 웨이블릿 변환을 통한 부대역간 주파수 성분의 특성을 이용하여 움직임 궤적의 분석에 적용하는 방법을 제시하고 있다. 실험 결과를 통하여 인위적인 약물 처리 전·후에 탐지되는 활동성을 표현하는 특징점의 수가 통계학적으로 유의함을 확인하였다.

■ 중심어 : | 웨이블릿 | 특징값추출 | 움직임분석 |

Abstract

This paper proposes the method that detects abnormal trajectory of fish with tracking data. And it is obtained by automatic tracking system based on conventional computer vision. Also, we analyze the trajectory using subband frequency features through DWT(Discrete Wavelet Transform). Through experimental results, we confirm that our results have some statistical means. The proposed method demonstrates that DWT is useful method for detecting presence of toxicoid features in environment as for an alternative of bio-monitoring tool.

■ keyword : | Wavelet | Feature Extraction | Motion Analysis |

1. 서론

근래에 들어 생물체를 대상으로 하는 추적 기술은 지속적으로 발전하여 왔다. 이러한 기술들의 대표적인 예로, 계절에 따라 수천 마일을 이동하는 조류나 포유류를 추적하는 인공위성 기반 추적 기술, 강 속 물고기들의 3차원적 움직임을 추적하기 위한 수중음향 기반 추적 기술, 수조에서의 플랑크톤이나 해파리의 움직임을 추적하기 위한 비디오 기반 기술 등이 있다. 또한 이러

한 생물체의 추적 데이터는 시간에 따라 기하급수적으로 누적되는 특징을 띠고 있다. 그러나 이렇게 증가하는 데이터를 효율적으로 분석하는 방법에 관한 연구는 데이터의 증가율에 비해 상대적으로 미비하다 하겠다. 또한 현재 많은 생태 관련 연구자들이 생물체의 행동에 관한 연구에 관심을 가지고 있으나, 대부분의 연구가 해당 연구자가 직접 비디오 화면을 여러 차례 반복하여 관찰하는 정도의 수준이며 이에 따라 움직임 데이터의 분석에 많은 시간이 소요되고 있는 실정이다. 만약 이

* 본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

접수번호 : #070119-002
접수일자 : 2007년 01월 19일

심사완료일 : 2007년 04월 24일
교신저자 : 김철기, e-mail : ckkim@pusan.ac.kr

러한 생물체의 행동들이 소프트웨어 시스템에 의해 자동적으로 인식되고 식별된다면 이러한 분야의 연구는 탄력을 받을 수 있을 것이다.

움직임 데이터의 자동 분석을 위하여 가장 많이 사용되는 방법으로 신호 분석(signal analysis) 방법이 있다. 이러한 방법은 움직임 궤적의 모델링(trajjectory modelling)에 기반하여 이루어질 수 있다. 궤적 모델링을 위하여 1950년대 이후 생물체의 움직임 경로의 프렉탈 차원의 예측과 같은 묘사적 측정에서부터 상관확률 보행(correlated random walk; CRW)에 이르는 방법까지 수 많은 방법들이 사용되고 있다[1-6]. 생물체의 움직임 궤적에 대한 수리적 분석에 관하여 Alt와 Hoffman은 1989년에 상관도 함수를 등각류 동물들의 짝짓기 움직임 궤적을 모델링하는데 적용하였다[7]. 또한 Tourtellot 등은 바퀴벌레 행동에 있어서 움직임의 길이와 방향 전환의 정의를 통하여 바퀴벌레의 귀소 본능을 분석하였다[8]. 그리고 인공신경망을 이용한 독극물 유입에 따른 어류의 행동 반응 인식에 관한 연구도 이루어져 왔다[9]. 그러나 기존의 인공신경망에 기반한 방법의 경우 움직임 궤적을 학습하기 위하여 학습 데이터를 추출하는데 많은 시간과 어려움이 존재하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 생물체 중 송사리를 이용하여 환경오염 물질에 반응하는 움직임 분석을 위하여 웨이블릿 변환과 논리 연산에 기반한 임계치(threshold) 방법을 이용하는 방법을 제시하고 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 움직임 분석 방법을 언급하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 설명하고 4장에서 실험결과 및 분석을 한 후, 5장에서 결론을 맺고 있다.

II. 움직임 분석 방법

1. 움직임의 정의

d-차원 상에서 어떤 유기체의 움직임을 일반적으로 궤적 $X(t)$ 로 표현한다고 하자. 단, $X \in \mathbb{R}^d$, $t \in \mathbb{R}$ 이 성립한다. 이때 CCD 카메라에 캡처된 실제 움직임 좌표들은 프레임(frame)에 기반한 이산적인 특성을 가지고 있

으므로 움직임 데이터는 시간(time; T_i)과 좌표값(X_i)으로 구성된 n 개의 점으로 표현 가능하다 (단, $i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$).

위의 정의에 의해 2차원 상에서 생물체의 움직임 궤적은 아래의 식 (1), (2)와 같이 시간축 상의 속도 벡터의 적분으로 표현할 수 있다. 즉

$$X(t) = \int_0^t v(t)dt = \sum_{i=0}^n \Delta X_i \quad (1)$$

$$X(t) = X(t-1) + \Delta X_i \quad (2)$$

와 같다.

2. 움직임의 분석 방법

2.1 공간 패턴 기반 분석 방법

공간 패턴 기반 분석방법의 한 예로, [그림 1]과 같이 분석하고자 하는 여러 개의 대표적인 움직임의 모형 또는 궤적을 정의한 후 정의된 움직임들과 비교하여 유사한 움직임 패턴을 찾는 방법이 있다[9]. 또한 정의된 움직임 패턴을 대상으로 특징 파라미터(parameter)를 추출하여 분석을 수행하게 된다. 예를 들어, 송사리(medaka)의 경우 움직임 속도(speed), 방향 변환 각도(angle), 각속도(angular velocity), 단위 시간 내 움직임 거리(movement length per unit time), 꼬불꼬불한 움직임(meander) 등 여러 특징 파라미터를 추출 가능하다. 그러나 자유 운동 모델의 정의는 일반적으로 방향성을 예측 가능하거나 정형적인 패턴을 갖는 경우에 모델의 수식화 등의 방법을 통하여 정의가 쉽게 이루어질 수 있으나, 생물체의 경우 특히, 자연 상태가 아닌 인위적인 각종 약물에 반응하는 움직임의 운동 모델은 명확하게 정의하는데 어려움이 따른다. 따라서 일반적으로 약물에 반응하는 움직임의 경우 여러 명의 관찰자가 동일한 움직임 데이터를 여러 번 반복 관찰을 통하여 대표되는 움직임 궤적 패턴을 정의하여 수동으로 분류하는 것이 보편적인 방법이었다. 따라서 이러한 방법의 경우 관찰자의 주관적 판단에 의한 실수에 의해 패턴의 잘못된 정의 및 오분류가 발생할 수 있는 단점이 존재한다.

2.2 주파수 패턴 기반 분석 방법

근래에 가장 많이 사용되는 주파수 기반 분석 방법은 크게 두 가지 변환 방법으로 분류할 수 있다. 첫 번째는, 2차원 고속 푸리에 변환에 기반하여 반복되는 움직임 패턴의 주파수 변환 값을 이용하는 방법이다.

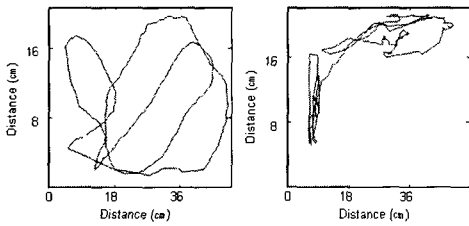


그림 1. 움직임 패턴의 예

그러나 푸리에 변환의 경우 변환할 때 시간(time) 성분을 잃어버리는 단점이 존재하므로 시계열 데이터의 분석 등 시간의 정보가 중요한 데이터 분석에는 부적합하다. 두 번째로, 푸리에 변환의 단점을 극복하기 위하여 1980년대 초에 소개된 웨이블릿 변환은 시계열 데이터의 분석에 매우 우수한 성능을 보이면서 여러 응용 분야에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 웨이블릿 변환의 가장 큰 특징으로 볼 수 있는 국부성(locality)은 이러한 웨이블릿 변환의 발전에 가장 큰 기여를 한 특징이라 하겠다.

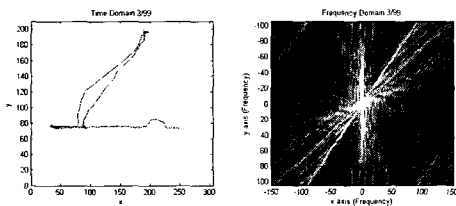


그림 2. 움직임 패턴의 FFT 변환

III. 제안하는 방법

웨이블릿 변환을 통한 다해상도 분해의 특징에 의해 저해상도 분해로 내려갈수록 국부적인 특징보다는 더 폭넓은 영역에 대한 특징을 띠고 있으며, 이와는 반대

로 고해상도 분해로 올라 갈수록 국부적인 특징을 잘 표현한다는 성질을 본 논문에서 제안하고자 하는 알고리즘의 기본 아이디어로 삼았다. 특히 고해상도의 경우 고주파 성분을 많이 포함하고 있으므로 노이즈에 해당하는 부분을 어떻게 제거하는가 하는 문제가 알고리즘의 성능을 결정하는 가장 큰 변수라 하겠다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 웨이블릿 변환의 특징인 다해상도 분해(Multi-Resolution Analysis; MRA)를 이용하였다. 즉, 입력된 신호에 대해 Daubechies 4 웨이블릿을 이용하여 이산웨이블릿변환을 8단계 수행한 후 획득된 주파수 성분들 중 최종 특징 계수값(Coefficient)을 선택하는 순서는 아래와 같다.

- 단계 1: 레벨 8에서 얻어진 고주파 성분에 대하여 일정한 임계치 ($\delta_1=0.01$) 보다 큰 계수값을 선택하여 참(TRUE)으로 플래그(flag)를 설정한다.
- 단계 2: 레벨 1에서 얻어진 고주파 성분에 대하여 일정한 임계치 ($\delta_2=0.05$) 보다 큰 계수값을 선택하여 참(TRUE)으로 플래그(flag)를 설정한다.
- 단계 3: 앞의 단계 1과 2에서 선택된 계수값들에 대해 아래의 [표 1]에서 보여주는 것처럼 논리 AND 연산을 수행한다. 즉, 레벨 8과 레벨 1에서 각각 얻어진 계수값에 대하여 서로 겹치는 부분을 최종 특징값으로 선택한다.

본 논문에서 특별히 레벨 8과 레벨 1을 선택한 이유는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 약물에 반응하는 움직임의 경우 갑작스런 경로의 변경이나 몸의 비틀(twist) 현상과 같이 시간 축을 따라 갑자기 변화하는 움직임 현상을 자주 나타내므로 고주파 성분을 많이 내포하고 있다. 그러나 이러한 운동의 경우 일반적인 노이즈(noise)와 구별이 어려우므로 노이즈가 제거된 고주파 성분의 정보가 필요하다. 둘째, 웨이블릿 변환을 사용할 경우 scaling factor가 작을수록(레벨이 낮을수록) 노이즈와 같은 더 많은 고주파 성분을 포함하고 있기 때문에 시간해상도(time resolution)가 높으며, 반대로 scaling factor가 클수록(레벨이 높을수록) 주파수

해상도(frequency resolution)이 높으므로 고주파 에너지가 높은 지역을 대략적(coarse)으로 결정해낼 수 있는 능력을 가지고 있다. 따라서 이러한 두 가지 성질을 결합한다면 주파수 해상도와 시간해상도를 적절히 잘 이용할 수 있다는 장점이 존재하므로 실험 치에 의해 레벨8과 레벨1의 고주파수 간의 AND 연산을 통하여 필요한 정보를 뽑아낼 수 있겠다.

표 1. A와 B에 대한 논리 AND 연산의 예

A	B	A AND B
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

위와 같은 단계를 아래의 수식 (3), (4), (5)에 나타내었다.

$$DWT(S_i) = App_i(i) + Det_i(i) \quad (3)$$

$$0 \leq l \leq 8, 0 \leq i \leq MaxCoeffSize$$

```
for (i = 1; i <= MaxCoeffSize; i++) {
    if (Det1(i) > δ1) then Det1(i) = TRUE;
    else Det1(i) = FALSE;
    if (Det8(i) > δ2) then Det8(i) = TRUE;
    else Det8(i) = FALSE;
}
```

$$if ((Det_1(i) \equiv TRUE) \wedge (Det_8(i) \equiv TRUE))$$

$$then Signal(i) = TRUE ;$$

$$else Signal(i) = FALSE ; \quad (5)$$

수식 (3)에서 App_i(i)는 웨이블릿 분해를 통해 생성되는 입력신호의 최저주파수 성분에 해당하며, Det_i(i)는 고주파수 성분에 해당한다. 그리고 MaxCoeffSize는 이산웨이블릿변환 계수의 크기를 나타낸다. 수식 (5)에서 표현된 Signal(i)는 입력된 움직임 궤적에 대한 위상(phase) 신호를 나타내며, TRUE는 특징값으로 선택되었음을 나타내고 FALSE는 특징값으로 선택되지 않았음을 나타낸다. 아래의 [그림 3]은 위상신호(본 논문에서

서는 Signal(i)를 나타냄)를 계산하기 위해 원점을 중심으로 시간이 흐름에 따라 변화하는 x, y 좌표값에 대한 각도를 계산한 것이다.

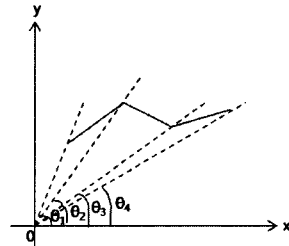


그림 3. 움직임 각도의 계산

IV. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 인텔 펜티엄 2.8GHz CPU와 1GB RAM이 장착된 PC상에서 Visual C++와 Matlab7.5를 이용하였다. 실험에 사용된 데이터는 송사리 4마리의 개체의 움직임 궤적이며, 실험을 위하여 구리(Cu) 1ppm을 투여하기 전·후 각각 3일씩 CCD 카메라를 이용하여 움직임을 추적하였다. 움직임을 추적하기 위한 기법은 배경갱신을 통한 추적기법(target tracking)을 사용하였다. 웨이블릿 변환에 사용한 모 웨이블릿(mother wavelet)은 Daubechie 4이며, 8단계 분해를 수행하였다. [그림 4]은 본 논문의 실험 환경을 보여주고 있다.

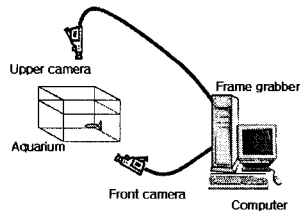


그림 4. 실험 환경

본 논문에서는 0.25초 간격으로 전면 카메라(front camera)만을 통하여 움직임 좌표들을 입력받았으며, 3030 프레임(frame)씩 묶어서 활동성 특징 분석을 하였

다(=3030×0.25초=759.5초=12.625분).

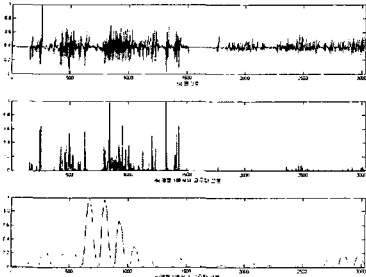


그림 5. 구리 1ppm 처리전 DWT 변환

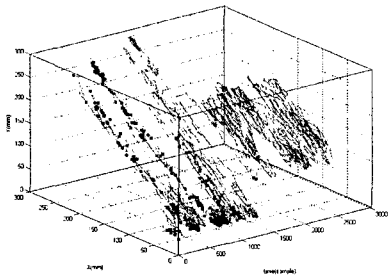


그림 6. 구리 1ppm 처리전 탐지결과 (■: 탐지지점)

[그림 5]와 [그림 6]은 각각 약물(Cu) 처리 전 송사리의 움직임 궤적에 대한 이산웨이블릿변환 결과와 특징값의 탐지 결과를 보여주고 있으며, 반대로 [그림 7]과 [그림 8]은 약물 처리 후 송사리의 움직임 궤적에 대한 이산웨이블릿 변환과 특징값의 탐지 결과를 보여주고 있다.

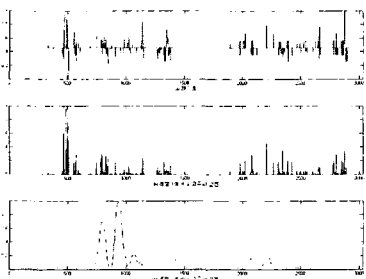


그림 7. 구리 1ppm 처리후 DWT 변환

[그림 5]와 [그림 7]의 신호를 비교하여 보면, 약물 처

리 전보다 약물 처리 후에 송사리의 활동성이 저하되었음을 발견할 수 있으며 또한, [그림 6]과 [그림 8]을 비교하여 보면 활동성을 표현하는 탐지지점(■: detection point)의 수에 있어 약물 처리 후 급격히 감소한 것을 알 수 있다.

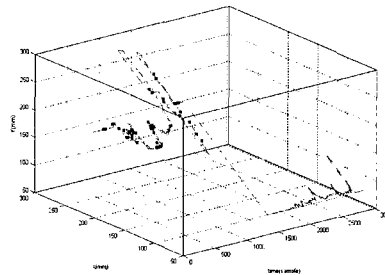


그림 8. 구리 1ppm 처리후 탐지결과 (■: 탐지지점)

아래의 [표 2]는 4마리 송사리 개체에 대한 약물 처리 전·후에 대하여 각각 탐지되는 활동성 탐지율의 변화를 통계적 분석 방법인 unpaired t-test를 사용하여 계산한 유의성 검증 결과이다. 각 샘플당 시간은 약 12.6 정도에 해당한다. 예를 들어, 개체 1의 경우 구리 처리 전 샘플 수가 35개이므로 '12.6분×35샘플=441분'의 시간동안 관찰한 결과가 된다.

표 2. 유의성 검증 결과(Student's t-test)

개체	약물 처리유무	샘플 수	평균	표준 편차	T	확률(p)
1	처리전	35	153.11	81.41	5.74	<0.000
	처리후	27	60.22	23.51		
2	처리전	34	115.47	66.02	5.56	<0.000
	처리후	33	44.79	31.68		
3	처리전	35	112.06	93.70	6.19	<0.000
	처리후	32	34.45	23.40		
4	처리전	35	95.00	69.87	3.16	<0.002
	처리후	35	53.74	32.77		

검증결과 각 개체에 대한 실험 결과를 기각할 확률이 최대 0.002 이하이므로 4마리 개체에 대한 활동성 비교 결과가 의미 있다고 분석할 수 있다. 또한 분석 결과에서 알 수 있듯이 탐지지점의 수가 약물 처리 전·후에 현격하게 차이가 나고 있다. 특히 구리의 경우 약물 처리 전의 활동이 처리 후의 활동에 비해 훨씬 활발함을

보여주고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 독성 물질에 반응하는 생물체의 행동 특성을 웨이블릿 변환을 이용하여 움직임 분석을 수행하는 방법을 제시하였다. 실험 결과, 일반적으로 약물을 투여하지 않은 송사리의 경우 전반적으로 움직임이 자유로우며 매우 활동적인데 반해, 약물을 투여한 후의 송사리의 움직임은 움직임이 매우 부자연스러우며 작은 떨림을 나타내며 멈추어 있는 시간이 많음을 알 수 있었다. 이러한 활동성 정도를 탐지점으로 설정하여 웨이블릿 변환의 주파수 분해능의 성질과 통계적 분석을 적용시켜 본 결과 약물 처리 전·후에 대하여 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 비정형적 움직임을 나타내는 생물체나 사물의 움직임을 분석하는데 있어 웨이블릿 변환의 폭넓은 응용 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 연구과제로는 다양한 독극물에 대하여 활동성 정도의 탐지 결과를 이용하여 정확한 오염발생시작지점의 자동 탐지를 위한 알고리즘의 개발이 필요하겠다.

참고 문헌

[1] D. J. Coughlin, J. R. Strickler, and B. Sanderson, "Swimming and search behaviour in clown fish (*Amphiprion perideraion*) larvae," *Animal Behavior*, Vol.44, pp.427-440, 1992.

[2] M. Dicke and P. A. Burroughs, "Using fractal dimensions for characterizing tortuosity of animal trails," *Physiological Entomology*, Vol.13, pp.393-398, 1988.

[3] V. A. J. Doerr and E. D. Doerr, "Fractal analysis can explain individual variation in dispersal search paths," *Ecology*, Vol.85, No.5, pp.1428-1438, 2004.

[4] F. Herve, S. Sonya, and H. Weimerkirsch, "Scale dependent hierarchical adjustments of

movement patterns in a long range foraging seabird," *Proceedings of the Royal Society of London B*, Vol.270, pp.1143-1148, 2003.

[5] C. S. Patlak, "A mathematical contribution to the study of orientation of organisms," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol.15, pp.431-476, 1953.

[6] S. Benhamou, "How to reliably estimate the tortuosity of an animal's path: straightness, sinuosity, or fractal dimension?," *J. of Theoretical Biology*, Vol.229, pp.209-220, 2004.

[7] W. Alt and G. Hoffman, *Biological Motion*, Springer-Verlag Berlin, 1989.

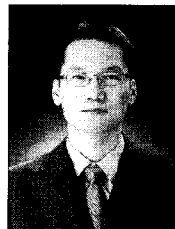
[8] M. K. Tourtellot, R. D. Collins, and W. J. Bell, "The problem of movelength and turn definition in analysis of orientation data," *J. of Theoretical Biology*, Vol.150, pp.287-297, 1991.

[9] C. K. Kim, I. S. Kwak, E. Y. Cha, and T. S. Chon, "Implementation of Wavelets and Artificial Neural Networks to Pattern Recognition of Response Behaviors of Chironomids for Water Quality Monitoring," *Proceedings of the International Society for Ecological Informatics*, Vol.3, p.43, 2002.

저자 소개

김철기(Cheol-Ki Kim)

정회원



- 1999년 2월 : 부산대학교 전자계산학과 (이학사)
 - 2001년 2월 : 부산대학교 전자계산학과 (이학석사)
 - 2003년 2월 : 부산대학교 전자계산학과 (이학박사)
 - 2003년 3월 ~ 2006년 2월 : 밀양대학교 컴퓨터공학과 조교수
 - 2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 디자인학과 조교수
- <관심분야> : 영상처리, 멀티미디어, 패턴분석, 색채 분석