

논문 2010-47SC-3-8

전기장을 이용한 물체의 거리 측정 연구

(Estimating Distance of a Target Object from the Background Objects with Electric Image)

심 미 영*, 김 대 은**

(Miyoung Sim and DaeEun Kim)

요 약

전기장은 수중에서의 주변 환경 인지, 물체 확인 과정에 사용 될 수 있다. 약한 전기장을 발생시키는 전기물고기는 전기장을 발생시켜 그 왜곡을 감지함으로써 주위 상황을 인지하고 먹이를 찾는 “능동 센싱”에 특화되어 있다. 이러한 “능동 센싱”과정은 전기물고기가 어두운 바다 속에서 시각적인 정보 없이도 먹이를 찾고 주변 환경을 탐지할 수 있게 해준다. 전기물고기는 몸 전체에 전기수용기를 가지고 있다. 수많은 전기수용기를 통해 얻어지는 센서 값은 ‘전기장 이미지’, 즉 시각적인 이미지가 아닌 전기장의 변화를 반영하는 물리적 이미지로 표현된다. 많은 사람들이 전기물고기가 시각 정보 없이도 전기장 이미지를 통해 어떻게 상황을 인지할 수 있는지 연구해 왔다. 많은 연구를 통해 전기장 이미지의 최대값, 기울기, 넓이, 피크의 위치 등이 목표 물체를 찾기 위한 단서로 사용될 수 있다는 사실이 이미 알려져 있다. 이 논문에서는 전기물고기의 전기장 이미지를 바탕으로 목표 물체 이외에 배경으로 생각할 수 있는 다른 물체가 있는 좀 더 복잡한 환경에서, 전기장 센서를 통해 목표 물체를 배경으로부터 분리하고 인지할 수 있는 방법을 제안한다. 이러한 복잡한 상황에서의 물체 인지 과정은 수중로봇의 물체 인식에 활용될 수 있다.

Abstract

Weakly electric fish uses active sensing to detect the distortion of self-generated electric field in the underwater environments. The active electrolocation makes it possible to identify target objects from the surroundings without vision in the dark sea. Weakly electric fish have many electroreceptors over the whole body surface of electric fish, and sensor readings from a collection of electroreceptors are represented as an electric image. Many researchers have worked on finding features in the electric image to know how the weakly electric fish identify the target object. In this paper, we suggest a new mechanism of how the electrolocation can recognize a given target object among object plants. This approach is based on the differential components of the electric image, and has a potential to be applied to the underwater robotic system for object localization.

Keywords : weakly electric fish, electrolocation, active sensing, underwater environment

I. 서 론

수중에서 물체를 인식하는 기술은 현재 많이 연구되어 있지는 않다. 본 논문은 약한 전기장을 발생시키는

전기물고기(weakly electric fish)의 물체 확인 과정을 모티브로 하여 수중에서 전기장 센서를 이용한 물체확인 기술을 제안한다.

전기물고기는 세포와 근육섬유가 변형된 조직인 전기발생기관(electric organ)을 통해 약한 전기장을 발생시킨다^[1]. 전기뱀장어나 가오리 등과 같은 강한 전기장을 발생시키는 전기물고기(strongly electric fish)는 450 volt에서 600 volt의 강한 전기장을 발생시키는데 반해 약한 전기장을 발생시키는 전기물고기가 만들어내는 전기장은 1volt 보다도 작기 때문에 그 전기장으로 사냥

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0000460)

접수일자: 2009년12월9일, 수정완료일: 2010년5월9일

을 하거나 적으로부터 자신을 보호하기는 어렵다^[2]. 대신 자신이 만들어 낸 전기장의 작은 왜곡을 감지하여 외부 환경과 먹이를 탐지한다.

약한 전기장을 발생시키는 전기물고기는 크게 두 가지의 전기수용기(electroreceptor)를 가지고 있다. 결절 모양의 전기수용기(tuberous electroreceptor)는 높은 주파수 성분을 가지는 전기장에 민감하게 반응하며 다른 종류의 단지모양의 전기수용기(ampullary receptor)는 다른 바다 생물들이 만들어내는 생체 에너지의 낮은 주파수 성분에 반응하고 감지할 수 있다^[3-5].

14,000여개의 결절 모양의 전기수용기가 전기물고기의 피부 표면에 분포되어 스스로 발생시킨 전기장에 민감하게 반응하여 '능동 센싱'을 한다^[4]. 돌고래나 박쥐의 경우 전면을 향하여 초음파를 발생시켜 능동 센싱을 하게 되고 전기물고기의 경우는 주변으로 전기장을 발생시키고 피부 전체에 퍼져 있는 전기수용기를 통해 전 방향에서 센싱을 한다. 전체 몸길이 정도의 범위 안에서 능동 센싱을 할 수 있다^[3, 6, 8].

시각과 같이 전기적인 센싱 과정에는 초점을 맞추는 과정이 없기 때문에 꼬리지느러미의 움직임이나 물체가 가까이 접근하는 방법으로 센싱을 하게 된다^[9]. 전기장 이미지는 피부 표면의 각각의 전기수용기로 유입되는 전기장의 크기를 이미지화 시킨 것으로 물체가 멀리 있는 경우 거리에 따라 급격하게 그 변화량이 감소하여 물체의 특성을 확인하기 힘들어 일정 범위 내에서의 센싱이 요구된다.

Rasnow는 전기물고기가 구형대의 물체를 어떻게 감지하는지 알기 위하여 물체의 사이즈, 전도도, 위치에 따라 전기장 이미지가 어떻게 달라지는지 보였다^[10]. 전기장 이미지에서 최대값을 가지는 지점은 머리로부터 꼬리로 이어지는 전후 축(rostrocaudal axis)에서의 물체의 위치를 보여주고, 물체의 측면 거리(lateral distance)는 전기장 이미지의 상대적인 폭을 통해 알 수 있다^[10-11].

전기장 이미지에서의 최대값과 최대기울기의 비율인 상대적 기울기(relative slope)는 물체의 모양이나 크기, 전도도에 상관없이 전기물고기의 측면 방향으로 물체가 얼마나 떨어져 있는지 알 수 있는 근거로 제시되었다^[1-14]. 물체가 전기물고기의 중심축으로부터 멀어질수록 상대적 기울기는 작아진다. 상대적 기울기와 같은 관점에서 전기장 이미지에서 최대값의 절반의 크기를 가지는 지점에서의 폭 (A full width at half maximum :

FWHM) 또한 물체의 성질에 상관없이 물체의 거리를 판단할 수 있는 근거가 될 수 있다^[15]. 꼬리지느러미의 움직임으로 인한 시간적 정보가 거리를 판별할 수 있는 단서를 제공하기도 한다^[17-18].

지금까지 연구는 하나의 독립된 물체에 초점을 맞추어 전기물고기의 물체 확인 과정을 다루어 왔다. 이 논문에서는 전기장 이미지를 통해 하나의 물체가 아닌 여러 개의 물체가 존재하는 복잡한 상황에서 전기물고기가 어떻게 물체를 감지하고 확인할 수 있는지 알아 본다.

II. Electric field와 전기장 이미지

1. 전기장 모델링

가. 전기장 모델링

본 논문에서는 전기물고기에 속하는 *Apteronotus albifrons*의 위치 추정을 조사한다. *A. albifrons*는 몸체의 중심축을 따라 꼬리 쪽에 발전기관을 가지고 있다. 시뮬레이션에서 전체 몸길이를 21 cm, 전기발생기관의 길이를 15.47 cm로 두었다^[19]. 전기발생기관은 전극의 집합체로 볼 수 있는데 1 cm 당 10개의 전극이 밀집하여 분포한다고 가정하면 전체 전극은 약 155개가 된다^[15]. 꼬리 끝에 존재하는 하나의 전극을 제외한 나머지 전극은 모두 양의 값을 가지고 모든 전극의 전하량의 합은 0이 된다.

전기발생기관으로 인한 전기장은 각각의 전극으로 인하여 발생하는 전위차의 합으로 구한다^[15]. n 개의 전극 중 1개의 음의 전극과 $n-1$ 개의 양의 전극이 존재 할 때 \vec{x} 에서의 전위차 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi(\vec{x}) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{q/(n-1)}{|\vec{x} - \vec{x}_p^i|} - \frac{q}{|\vec{x} - \vec{x}_p^n|} \quad (1)$$

여기서 \vec{x}_p^i 는 i 번째 전극의 위치이고 \vec{x}_p^n 는 마지막 n 번째 전극인 음의 전극의 위치가 된다. 하나의 양의 전극의 전하량은 $q/(n-1)$ 이고 음의 전극은 $-q$ 를 전하량으로 가진다. 전기장은 전위차의 그래디언트(gradient)로 계산된다.

각각의 전기수용기에 수직하게 입사하는 값만을 고려하기 위하여 피부 표면에서의 전위차(transdermal potential difference) $V_{td}(\vec{x})$ 를 구할 수 있다. \vec{x}_s 를 하

나의 고정된 수용기의 위치 벡터라고 할 때, 그 수용기에서 수직 벡터를 $\hat{n}(\vec{x}_s)$ 로 표현할 수 있고 $V_{td}(\vec{x})$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{td}(\vec{x}_s) = E(\vec{x}_s) \cdot \hat{n}(\vec{x}_s) \frac{\rho_{skin}}{\rho_{water}} \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물과 전기물고기 표면에서의 저항률이고 ρ_{skin}/ρ_{water} 은 약 0.1에서 0.5 사이의 값을 가진다^[10].

나. 구형의 물체로 인한 전기장 변화

구 형태의 물체로 인한 전위차의 변화는 다음과 같이 유도된다.

$$\delta V(\vec{x}) = \chi \frac{r^3 E(\vec{x}_{obj}) \cdot (\vec{x} - \vec{x}_{obj})}{|\vec{x} - \vec{x}_{obj}|^3} \quad (3)$$

r 는 물체의 반지름, χ 는 물체의 전기적인 성질을 보여주는 전기 상수로 1 부터 -0.5 사이 값을 가지며 1은 완벽한 전도체를 -0.5는 완벽한 부도체를 의미한다. $E(\vec{x}_{obj})$ 는 \vec{x}_{obj} 에서의 전기장이다.

2. 전기장 이미지

가. 수용기의 모델링

수용기는 모델링의 단순화를 위해 일정한 밀도를 가지고 전기물고기 표면을 따라 직선으로 분포되어 있다고 가정한다. 즉 전기물고기의 머리로부터 꼬리방향으로 조금 내려온 지점부터 시작해 꼬리가 시작하는 지점까지 균등하게 분포하고 꼬리 쪽으로 갈수록 물체의 중심축과 가까워진다.

나. 전기장 이미지

각각의 전기수용기에서의 V_{td} 의 변화량 값을 읽어 전기장 이미지로 표현할 수 있다. 전기물고기의 근처에 도체의 물체가 있다면 그 물체로부터 가장 가까운 수용기에서 가장 큰 값을 가질 것이고 물체에서 멀어질수록 그 값이 작아져 물체가 가까운 지점을 중심으로 포물선 형태의 곡선을 그린다.

전기장 이미지는 물체의 위치뿐만 아니라 크기, 전기적 성질, 모양 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 전기물고기가 전기수용기를 통해 얻어지는 센서 이미지를 통해 물체를 어떻게 인지하고 그 위치를 파악하는가

에 대해서는 많은 논의가 이루어져왔다. 본 논문에서는 하나의 목표 물체만이 존재하는 상황이 아니라 배경 물체(object plant)^[20]가 존재하는 상황에서 어떻게 목표 물체를 인식하고 구별해 낼 수 있는지에 대한 새로운 방법을 제안한다.

III. 실험

가. 복잡한 환경에서의 전기장 이미지

실제 전기물고기가 먹잇감을 사냥하는 환경은 여러 실험에서 가정된 상황보다 훨씬 더 복잡한 환경에서 이루어진다. 전기물고기가 전기수용기를 통해 능동 센싱을 하는 영역이 좁은 편이고 거리에 따라 센서값이 급격하게 줄어들어 주위 환경의 변화로 인한 변화량 또한 작아져 무시될 수도 있다^[6, 15]. 종 모양의 곡선을 그리는 전기장 이미지는 사람의 시각 이미지와는 다른 특징을 가지기 때문에 물체가 물고기로부터 멀어질수록 그 크기는 작아지고 폭은 넓어진다. 그리고 *A. albifrons*와 같은 전기물고기가 주로 먹이로 삼는 물벼룩이나 곤충의 유충은 그 크기가 매우 작기 때문에 그로 인한 전기장 이미지의 변화는 매우 급격하고 가파른 언덕을 가지게 된다. 따라서 근거리에서 위치한 먹이로 인한 전기장 이미지는 높은 주파수 성격을 가지고 멀리 떨어진 다른 물체와 물고기의 움직임으로 인한 전기장의 변화는 더 천천히 변하는 저주파수 성격을 가지게 된다. 따라서 고주파수 성격을 가지는 물체로 인한 전기적 신호를 여러 잡음으로부터 분리할 수 있다. 하지만 배경이 되는 물체가 충분히 가까운 거리에서 목표 물체와 비슷한 성격을 가질 때 목표가 되는 물체를 배경으로부터 분리해 내는 것은 쉬운 일이 아니다.

Babineau는 배경 물체를 삼입하여 여러 물체들 사이에서 목표 물체를 어떻게 인식할 수 있는지 보여준다^[19]. 배경 물체들은 일정한 간격을 유지하면서 전기물고기의 중심으로부터 같은 거리에 배치된다. 배경 물체의 개수, 물체들의 사이간격은 물체 인식에 영향을 미치는 요인이 될 수 있다. 배경 물체간의 간격이 좁으면 각 물체의 포물선 형태의 곡선이 겹치면서 각각의 피크가 중첩되어 부드럽게 변하는 저주파수 성격을 지니는 하나의 포물선 형태의 곡선이 나타나 고주파수 성격의 목표 물체를 쉽게 분리해낼 수 있지만 그 간격이 커질수록 각 물체로 인한 피크가 두드러지게 되고 목표 물체로 인한 피크 점을 구분하기가 어려워진다(그림 1~2).

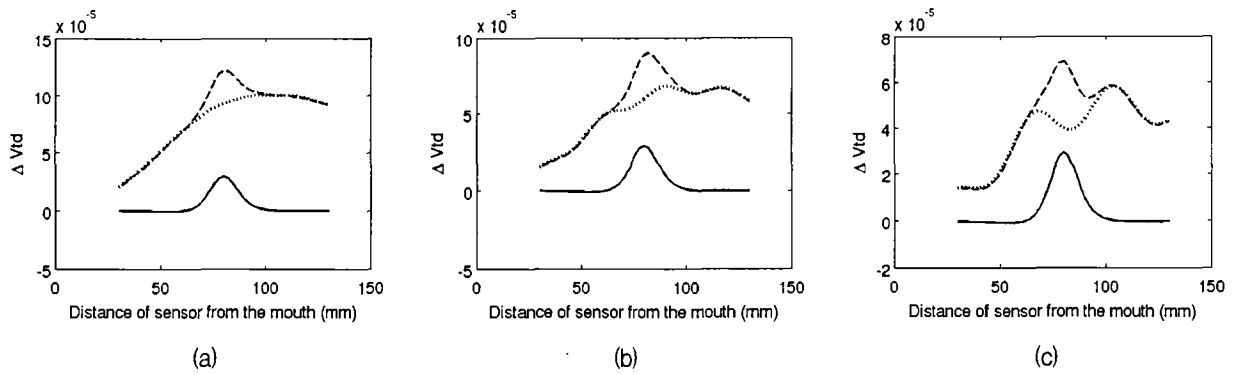


그림 1. 배경물체의 사이 간격이 변화할 때 상황에 따른 전기장 이미지 (a) 간격이 2 cm, (b) 3 cm, (c) 4 cm ('실선' 목표물체만 있는 경우, '점선' 배경물체만 있는 경우, '파선' 목표물체와 배경물체가 함께 있는 경우)

Fig. 1. Electric image when the interval of an object plant changes (a) The interval is 2 cm (b) 3 cm and (c) 4 cm ('solid line' only the target object, 'dotted line' the object plant, 'dashed line' both target object and object plant exist).

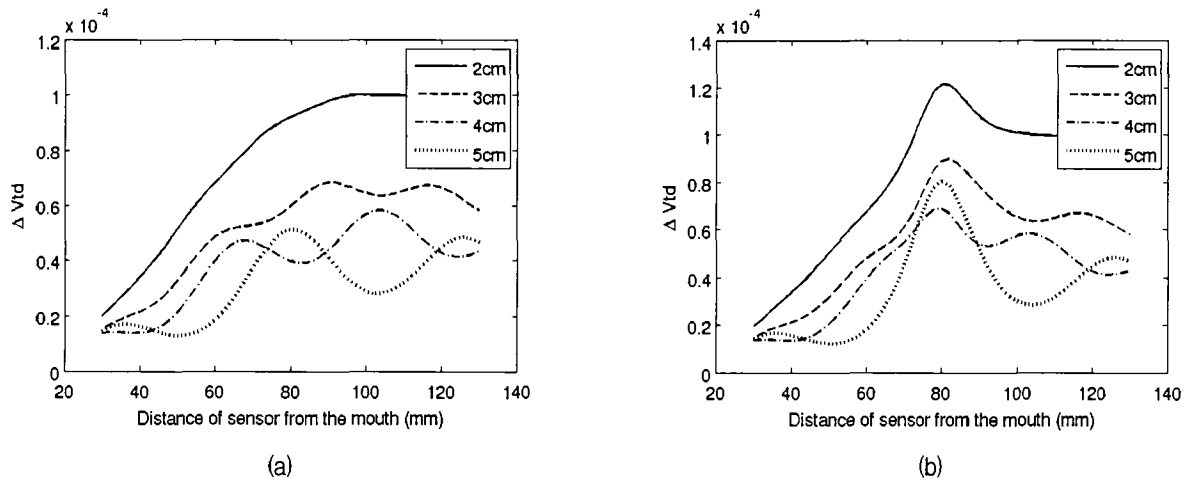


그림 2. 배경물체의 간격이 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm으로 변할 때 전기장 이미지 (a) 배경물체만 있는 경우 (b) 목표물체와 배경물체가 함께 있는 경우

Fig. 2. Electric image for intervals of object plant 2 cm, 3 cm, 4 cm, and 5cm. (a) The object plant (b) both target object and object plant exist

그림 1은 배경이 되는 물체들, 배경 물체 간의 거리가 달라질 때 배경 물체가 있는 경우와 없는 경우, 배경 물체만 있는 경우 전기장 이미지를 보여준다. 실선은 목표 물체만 존재하는 경우의 전기장 변화를 보여주며 전기물고기의 위 아래 축 선상에서 입으로부터 8 cm 떨어져 있는 것을 알 수 있다. 배경 물체 간의 거리가 멀어질수록 각각의 피크가 눈에 띄게 두드러지게 드러나게 된다^[20]. 그림 1 (a)에서는 배경 물체의 중심 간격이 2 cm이다. 이 경우 물체들이 매우 가까이 존재하게 되고 그 전기장 이미지는 하나의 큰 물체가 존재하는 것처럼 매끄러운 곡선을 보여준다. 이 경우 배경 물체로 인한 변화는 저주파수 성격을 가지게 되고 목표 물

체로 인한 변화가 확실하게 보인다. 이로써 물체가 어디에 존재하는지 확인할 수 있다. 배경 물체의 중심 간격이 3 cm (그림 1 (b)), 4 cm (그림 1 (c))로 변할수록 배경 물체 각각의 포물선 형태의 전기장 변화가 드러나게 되는데 그림 2 (a)에서 보는 바와 같이 울퉁불퉁한 형태의 전기장 이미지가 형성되고 목표 물체가 배경 물체와 전기물고기 사이에 존재해도 피크가 여러 개 존재하게 되고 목표 물체의 위치를 파악하기 힘들어진다.

나. 미분 곡선과 위치 추정

목표 물체가 배경 물체들에 비해 상대적으로 작은 크기를 가지고 전기물고기에 가까운 거리에 존재한다고

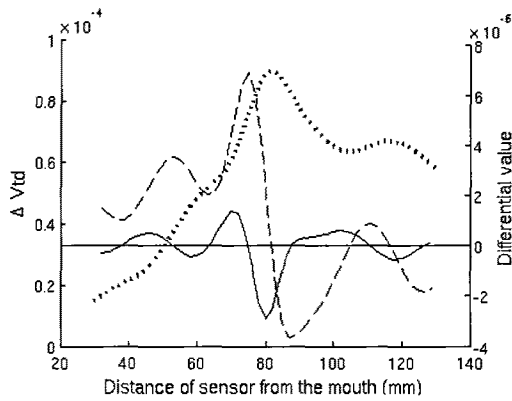


그림 3. 목표 물체와 배경물체들이 함께 있는 경우 정규화 된 전기장 이미지('점선')와 그 1차 미분 곡선('파선') 2차 미분 곡선('실선') (1차, 2차 미분곡선은 오른쪽 y축 값을 따름)

Fig. 3. Electric image when both target object and object plant exist ('dotted line') 1st derivative curve ('dashed line') 2nd derivative curve ('solid line') (Derivative curves follow right axis).

가정하면 목표 물체로 인한 전기장의 변화는 배경 물체로 인한 변화보다 더 고주파 성분을 가지게 된다. 그림 2 (b)에서 목표 물체는 전기물고기의 입으로부터 8 cm 떨어진 지점에 존재하는데, 목표 물체가 있는 지점에서 가장 급격한 변화가 있는 것을 알 수 있다.

그림 2 (b)와 같이 목표가 되는 물체와 배경 물체가 함께 존재하는 경우의 전기장 이미지에서 목표 물체의 위치를 추정하기 위해 미분 곡선을 구해보면 그림 3과 같다.

그림 3에서 실선은 목표 물체와 배경 물체가 있는 경우 원래 곡선이며 파선은 1차 미분한 경우, 점선은 2차 미분한 경우의 곡선을 보여준다. 그림 3에서의 수평의 실선은 미분 곡선에서 0점을 지나는 실선으로 원래 곡선에서 피크가 나타나는 지점마다 1차 미분 곡선은 0점을 지난다. 특히 목표 물체가 있는 지점에서 기울기의 크기가 가장 큰데, 이것은 목표 물체가 있는 지점에서의 전기장 이미지의 변화가 가장 급격함을 의미한다. 여기서 2차 미분을 하면 그 변화를 더 확실히 알 수 있다. 물체로 인한 전기장 이미지가 증가하다 감소하는 형태를 가지기 때문에 2차 미분 곡선에서 최소값을 가지는 지점이 목표 물체가 있는 지점이 된다.

그림 4와 같이 배경 물체의 중심 간격이 달라져도 원래 목표 물체로 인한 피크점과 2차 미분을 했을 때의 최소값을 가지는 지점이 일치하게 된다. 기존의 실험을 통해 배경 물체들이 배경 물체로부터 목표 물체의 분리가 어느 정도 가능하기 때문에 그 변화 정도 즉 고주파수의 성격을 이용하면 미분 곡선을 통해 쉽게 목표 물체의 위치를 추정할 수 있다.

IV. 결 론

전기물고기는 전기적 위치 추정 과정이 매우 특화되어 있는데, 전기장 센서의 센싱 메카니즘에 많은 응용 가능성을 제시할 수 있다. 전기장을 이용한 센서는 센싱 범위가 매우 좁지만 전방향으로의 센싱이 가능하고,

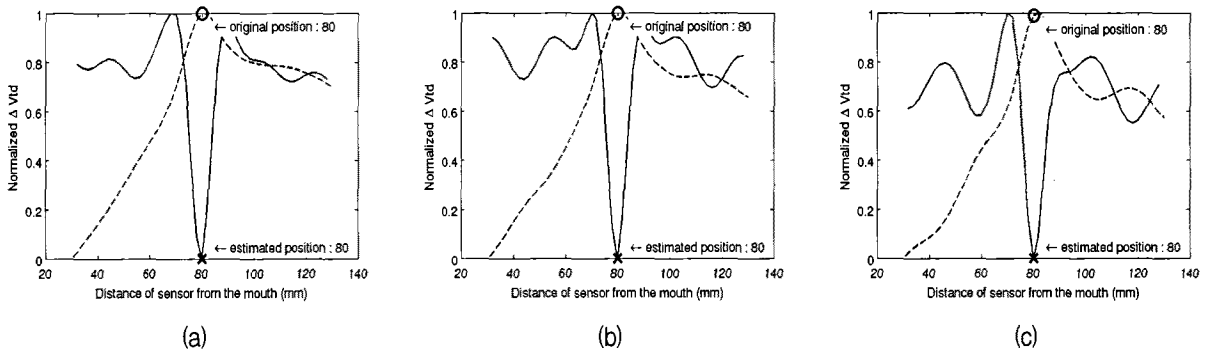


그림 4. 미분이미지를 통한 목표 물체 위치 추정, 목표물체의 반지름이 0,3 cm이고 경우 각각 배경물체의 간격이 (a) 2 cm, (b) 3 cm, (c) 4 cm인 경우 정규화 된 전기장 이미지 ('점선') 목표물체와 배경물체가 함께 있는 경우 '실선' 점선의 2차 미분 곡선 'o' 목표물체의 실제 위 아래 축 위치 'x' 2차미분 곡선에서 추정된 위치)

Fig. 4. Estimation of rostrocaudal position of the target object based on derivative curve for intervals (a) 2 cm (b) 3 cm (c) 4 cm ('dotted line' normalized electric image when both target object and object plant exist 'solid line' 2nd derivative curve 'o' original rostrocaudal position of the target object 'x' estimated position at the 2nd derivative curve.

전기장 이미지를 통해 거리 뿐 아니라 물체의 성질도 알 수 있다.

지금까지 이 연구는 주로 하나의 목표 물체에 대해서 연구가 진행되어 왔고, 최근 배경물체를 두고 전기장 이미지를 분석하는 등 복잡한 환경에서 목표 물체를 구분하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 배경 물체로 인한 변화가 어느 정도 간격을 유지할 때 목표 물체로 인한 전기장 이미지를 배경으로부터 구분할 수 있는지에 대한 문제에만 초점이 맞추어져 있었다^[20].

본 논문에서는 목표 물체 하나만 존재하는 경우를 벗어나 여러 개의 배경 물체가 존재하는 경우 목표 위치를 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

실제로 배경으로 간주되는 바위나 꼬리지느러미의 움직임과 같은 전기물고기 자체의 움직임은 전기물고기에 근접해 있는 목표 물체로 인한 변화 보다 부드럽게 변하는 저주파 성분으로 간주된다^[15,16]. 전기물고기의 결절 모양의 전기수용기는 고주파 성분에 더 민감하게 반응하기 때문에 이런 성질을 이용하여 목표 물체를 인식할 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서의 실험 결과 또한 전기수용기를 통해 받아드리는 전기장의 변화 중 그 차이가 큰 지점이 목표 물체가 있는 지점과 일치하고 있다는 것을 보여준다. 이러한 위치 추정은 배경이 물체보다 크고 멀리 떨어져 있다는 것을 가정했을 때 그 배경 물체들의 간격이 크더라도 적용된다. 따라서 전기물고기가 전기수용기 간의 반응 차를 계산하여 그 변화 정도로 물체의 위치를 파악하는 것으로 예상된다.

미분 곡선, 즉 센서 값 간의 차이를 이용하면 물체의 위 아래 축에서의 위치를 간단하게 알 수 있지만 측면 거리를 추측하기는 쉽지 않다. 지금까지 배경 또는 잡음으로 작용할 수 있는 다른 물체가 존재하는 복잡한 환경에서 물체의 측면거리를 추정하는 방법에 대한 연구는 진행되지 않았다. 이런 경우 배경 잡음을 예상하고 상쇄 시키는 과정을 통해 목표 물체의 정확한 위치를 추측할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서 제안하는 것처럼 센서값 간의 차이를 통한 변화량을 물체 확인 과정에 이용할 수 있다. 이에 더하여 기존의 배경을 기억하고 있다가 그 배경을 상쇄 시키는 방법을 통해 물체의 정확한 위치를 추정할 수 있다. 이와 같은 물체 확인 과정을 수중 로봇에 이용한다면 전방향에서 배경으로부터 물체를 추출하고 그 위치를 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M.A. MacIver, "The computational neuroethology of weakly electric fish: body modeling, motion analysis, and sensory signal estimation", PhD thesis, University of Illinois, 2001.
- [2] N. Machiavelli, "Columbia Electronic Encyclopedia", Columbia University Press.
- [3] M.E. Nelson and M.A. MacIver, "Prey capture in the weakly electric fish *Apteronotus albifrons*: sensory acquisition strategies and electrosensory consequences", *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, no 10, pp.1195, 1999.
- [4] M.E. Nelson, M.A. MacIver, and S. Coombs, "Modeling electrosensory and mechanosensory images during the predatory behavior of weakly electric fish", *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 59, no. 4, pp.199-210.
- [5] G. Von der Emde and S. Fetz, "Distance, shape and more: recognition of object features during active electrolocation in a weakly electric fish", *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, no. 17, pp.3082, 2007.
- [6] M.E. Nelson and M.A. MacIver, "Sensory acquisition in active sensing systems", *Journal of Comparative Physiology A.*, vol. 192, no. 6, pp.573-586, 2006.
- [7] B. Kramer, "Electroreception and communication in fishes", Gustav Fischer, 1996.
- [8] M.E. Nelson, "Target detection, image analysis, and modeling", *Springer Handbook of Auditory Research*, vol. 21, pp.290, 2005.
- [9] W. Heiligenberg, "Theoretical and experimental approaches to spatial aspects of electrolocation", *Journal of Comparative Physiology A.*, vol. 103, no. 3, pp.247-272, 1975.
- [10] B. Rasnow, "The effects of simple objects on the electric field of *Apteronotus*", *Journal of Comparative Physiology A.*, vol. 178, no. 3, pp.397-411, 1996.
- [11] G. Von der Emde, S. Schwarz, L. Gomez, R. Budelli, and K. Gjerant, "Electric fish measure distance in the dar", *Nature*, vol. 395, pp.890-894, 1998.
- [12] G. Von der Emde, "Active electrolocation of objects in weakly electric fish", *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, no. 10, pp.1205, 1999.
- [13] S. Schwarz and G. Von der Emde, "Distance discrimination during active electrolocation in the weakly electric fish *Gnathonemus petersii*",

- Journal of Comparative Physiology A, vol. 186, no. 12, pp.1185-1197, 2001.
- [14] E.A. Sicardi, A.A. Caputi, and R. Budelli, "Physical basis of distance discrimination in weakly electric fish", Physica A., vol. 283, no. 1-2, pp.86-93, 2000.
- [15] L. Chen, J.L. House, R. Krahe, and N.E. Nelson, "Modeling signal and background components of electrosensory scenes", Journal of Comparative Physiology A., vol. 191, no. 4, pp.331-345, 2005.
- [16] J. Engelmann, J. Babelo, M. Metzen, R. Pusch, B. Bouton, A. Migliaro, A. Caputi, R. Budelli, K. Grant, and G. Von der Emde, "Electric imaging through active electrolocation: implication for the analysis of complex scenes", Biological Cybernetics, vol. 98, no. 6, pp.519-539, 2008.
- [17] M. Sim and D. Kim, "Distance discrimination of weakly electric fish with a sweep of tail bending movements", ECAL, 2009.
- [18] 심미영, 김대은, "전기물고기의 거리 측정 : 꼬리지느러미의 움직임과의 관계", 한국지능로봇 종합학술대회, 2009
- [19] D. Babineau, A. Longtin, and J.E. Lewis, "Modeling the electric field of weakly electric fish", Journal of Experimental Biology, vol. 209, no. 18, pp.3636, 2006.
- [20] D. Babineau, J.E. Lewis, and A. Longtin, "Spatial acuity and prey detection in weakly electric fish", PLoS Comput Biol, vol. 3, no. 3, pp.e38, 2007.

 저 자 소 개



심 미 영(학생회원)
 2009년 연세대학교 전기전자
 공학부 학사 졸업.
 <주관심분야 : 바이오로보틱스,
 인공지능, 신경과학, 인지과학>



김 대 은(정회원)
 1989년 서울대학교 컴퓨터공학과
 학사 졸업.
 1993년 The University of
 Michigan, Ann Arbor,
 USA 석사
 2002년 The University of
 Edinburgh, UK, 박사
 2002년 Max Planck Institute for Human
 Cognitive & Brain Sciences, Cognitive
 Robotics, Research Scientist
 2006년 The University of Leicester,
 Neurobiology Lab, Research Associate
 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학과 조교수
 <주관심분야 : 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생
 명, 신경과학, 인지과학>