센서노드 선정기법 기반 수중 무선센서망 분산형 표적추적필터

Sensor Nodes Selecting Schemes-based Distributed Target Tracking Filter for Underwater Wireless Sensor Networks

유 창 호, 최 재 원*

(Chang Ho Yu¹ and Jae Weon Choi²)

¹Department of Intelligent Mechanical Engineering, Pusan National University

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper deals with the problem of accurately tracking a single target moving through UWSNs (Underwater Wireless Sensor Networks) by employing underwater acoustic sensors. This paper addresses the issues of estimating the states of the target, and improving energy efficiency by applying a Kalman filter in a distributed architecture. Each underwater wireless sensor nodes composing the UWSNs is battery-powered, so the energy conservation problem is a critical issue. This paper provides an algorithm which increases the energy efficiency of each sensor node through WuS (Waked-up/Sleeping) and VM (Valid Measurement) selecting schemes. Simulation results illustrate the performance of the distributed tracking filter.

Keywords: UWSNs, Kalman filter, WuS scheme, VM scheme, Distributed architecture

1. 서론

인간, 컴퓨터, 사물을 유기적으로 연계하여 다양하고 편리한 서비스를 제공해 주는 유비쿼터스 컴퓨팅 환경에서, 외부 환경의 감시와 제어 기능을 수행할 수 있는 센서망(sensor networks) 기술이 최근 활발히 연구되고 있다. 이러한 센서망 기술은 다양한 종류의 센서 개발과 저전력, 저가격의 무선 통신 기술, 초소형 마이크로 프로세스 기술 등의 발전에 따라 다양한 분야에서 연구되고 있다. 센서망 기술을 군사용 시스템에 적용하여 직접 접근이 위험한 적진의 군사 동향 감시, 적 병력 위치 추적 등을 가능하게 하고, 장기간의 관찰이 필요한 생태계 감시 시스템 등과 같은 과학적 응용으로도 센서망 기술의 적용이 가능하다. 또한 상업적 응용으로 교통의 감시와 제어를 위한 최첨단 지능형 교통 시스템, 지진에 능동적으로 대처하여 건물의 안전을 지키는 구조물 안전 시스템, 환경의 영향을 고려하여 필요할 때 농작물에 물과 비료를 주어 비용을 줄이기 위한 경작 시스템 등 다양한 분야에 센서망 기술을 적용할 수 있다[1]. 이러한 센서망 기술 응용이 가능하려면 많은 센서가 필요하고 경우에 따라서는 수백 수천 개의 센서가 필요한 경우도 있어서 센서 장치의 가격을 낮추는 것이 아주 중요하다. 또 센서가 배터리 교환 없이 수년 이상 동작 가능해야 하고 인간의 간섭 없이도 스스로 망을 구성할 수 있어야 한다.

그림 1. 수중 무선센서망 구조.

Fig. 1. Architecture of UWSNs.

수중 무선센서망(UWSNs: Underwater Wireless Sensor Networks)은 항법(navigation)과 전술적인 감시(surveillance) 체계를 바탕으로 오염 감시, 해안 정찰, 재난 방지, 그리고 자연적인 해저 자원의 탐사와 협동의 감시 임무들을 통한 과학적인 해양 데이터 수집을 위해 적용되는 수중용 무선 센서망이다. 수중 무선센서망은 그림 1과 같이 다수의 무인 혹은 자율 수중 운항체(UUVs: Unmanned Underwater Vehicles or AUVs: Autonomous Underwater Vehicles)들과 해저면의 수백 수천 개의 음향(acoustic) 센서노드들로 구성되어 수중 통신을 통해 수중에서의 감시와 제어 기능을 수행한다[2,3]. 수중 무선센서망의 구성은 2가지 혹은 3가지의 층으로 구성이 가능하다. 먼저 최하위층에서는 수백 수천 개의 센서노드(sensor node)가 배치되며, 데이터를 모으고 Short-Range 음파모뎀을 통해 다른 센서노드들과 교신하는 역할을 한다. 센서노드는 배터리에 의해 작동되고 오랜 시간 동안 동작하기 위해 대부분의 시간을 휴면상태로 작동한다. 센서노드들은 여러 전략적 배치가 가능한데, 그림 1에서는 해저면에 분포되어 있지만, 탐지를 피해 해저면에 묻을 수도 있다. 그리고 앵커(anchor)를 이용할 경우 해저 중간층에 센서노드를 배치시킴으로써 해저면 뿐만 아니라

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

유창호: 부산대학교 지능기계공학과(changhoyu@pusan.ac.kr)

최재원: 부산대학교 기계공학부(choijw@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

수중의 어떤 위치든 데이터 수집 및 교신이 가능하다. 하지만 앵커의 표류와 같은 외부영향에 의한 외란으로 인해 센서노드의 이동 문제가 발생할 수 있기 때문에 센서노드들의 위치를 계산하는 위치인식(localization) 알고리즘에 관한 연구가 수반되어야 하며 이에 관한 연구가 진행된 바 있다[4,5]. 최상위층은 네트워크를 통제하는 노드로서, 모든 데이터를 저장하고 처리하는 역할을 한다. 그림 1에서 플랫폼(platform) 혹은 제어노드(control node)가 이런 종류의 노드로 볼 수 있으며, 해상의 함정이 제어노드가 될 수 있으며, 해안과 가까운 육상에 제어노드가 위치할 수도 있다. 제어노드는 배터리에 의존하는 해저면의 센서노드와 달리 함정 및 육상의 전력을 사용하기 때문에 전력 소모에 있어서도 자유로우며, 수중 음파 모델을 통해 수중 센서노드들과 직접적인 교신이 가능하다. 그리고 그림 1에서 부이(buoy)와 싱크(sink)로 표현된 기준노드(reference node)는 최하위층의 센서노드에서 측정된 데이터를 제어노드로 전달할 뿐만 아니라 데이터 수집의 기능도 가지고 있다. 마지막으로 AUV는 수중에서 이동하며 다른 노드들과 상호 작용이 가능한 제어 및 기준노드로 볼 수 있다.

많은 연구자들이 수중 무선센서망 기술을 구현하기 위해 연구를 진행 중이며 상당한 성과가 있었지만, 제한된 음파 대역폭과 음파 지연, Multi-path와 Fading에 의한 신호왜곡, 신호의 전파속도에 따른 Propagation Delay, 무전달 지역(Shadow Zone)에 의한 통신 제한, 센서노드의 배터리 교체 및 충전의 어려움, 방수와 부식에 의한 노드의 손실과 같은 문제들이 여전히 해결해야 할 과제들로 남아있다. 실제적으로 수중에 설치된 센서노드들은 외부 전력의 공급없이 자체 배터리에만 의존할 뿐만 아니라, 배터리 교체 및 충전도 거의 불가능하다[6].

일반적으로 무선센서망 환경에서 표적을 추적하기 위해 개발된 표적추적필터는 두 가지 구조로 구분할 수 있는데, 한 가지는 중앙 집중식 구조를 사용하는 것으로 모든 센서노드의 측정치들이 중앙 처리장치로 보내어지는 구조이다. 중앙 집중식 구조는 모든 센서노드의 통신이 가능하도록 넓은 대역폭을 필요로 하는데 이것은 각 센서노드의 배터리 수명에 막대한 영향을 끼치며 강인성 및 신뢰성이 부족한 단점이 있다[1]. 다른 한 가지 방법은 분산식 구조를 사용하여 표적을 추적하는 방법인데, 무선센서망에서는 통신 부담을 줄이기 위해 분산식 구조를 많이 사용한다. 분산식 구조에서는 표적 근처에 있는 센서노드를 프로세싱 노드로 선택하고 프로세싱 노드 근처의 일부의 센서노드들만 데이터를 수집하는데 사용하는 반면, 나머지 센서노드들은 전력 소모를 줄이기 위해 수면 모드(sleeping mode)로 전환한다. 이러한 분산식 구조는 센서망의 변화나 센서노드의 고장에 대해 강인하다는 장점이 있다[7-9].

본 논문에서는 무선센서망의 특수한 환경이라 할 수 있는 수중 무선센서망에서의 표적추적 문제를 다루고자 한다. 앞서 언급한 수중 무선센서망 기술 구현을 위해 해결해야 할 많은 문제점들 중 센서노드의 에너지 문제에 집중하여 에너지 효율적인 분산식 구조를 적용한 표적추적필터를 제안한다. 활성/비활성(WuS: Waked-up/Sleeping) 센서 선정기

법 및 유효 측정치(VM: Valid Measurement) 선정기법을 통해 분산식 구조의 효율성을 높이고, 수중 무선센서망에서 저기동하는 단일표적을 추적하기 위해 표적의 위치정보 측정치를 바탕으로 분산식 구조의 칼만필터를 적용하여 표적의 상태를 추정하는 2차원(2-dimension) 표적추적 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 제안하는 분산형 표적추적필터의 구현을 위해 수중 무선센서망의 최하위층인 해저면에 일정 간격으로 음향(acoustic) 센서노드를 매설하고 각 센서노드들은 표적의 위치정보만을 제공한다고 가정한다. 일정 간격의 센서노드 배치는 현재 국방과학연구소에서 진행 중인 연구과제에서 요구하는 환경조건이며, 일정 간격의 센서노드 배치 환경뿐만 아니라 센서노드들의 위치가 균일하지 않은 랜덤(random) 간격의 센서노드 배치 환경도 [5]에서 제시하는 센서노드 위치인식 알고리즘에 의해 센서노드들의 위치를 계산할 수 있으며, 표적추적 역시 효과적으로 수행할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 본 논문에서 다루고자 하는 문제에 대해 정의를 내리고, III 장에서는 칼만필터에 기반한 분산형 표적추적 알고리즘에 대해 소개한다. IV 장은 본 논문에서 제안하는 활성/비활성 센서 및 유효 측정치 센서와 같은 센서노드 선정기법을 다룬다. 그리고 V 장에서 센서노드들을 일정 간격으로 분포시킨 시뮬레이션 환경을 통해 제안한 표적추적필터의 성능을 분석하고, 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 문제 설정

본 논문은 수중 무선센서망에서 저기동하는 단일표적의 상태를 추정하기 위해 등속 및 등가속 운동 모델을 사용한 칼만필터 기반 분산형 표적추적 알고리즘을 제시한다. 이를 위해 본 장에서는 수중 무선센서망의 2차원 공간인 해저면을 움직이는 표적의 상태를 표현하기 위해 등속 및 등가속 운동 모델의 상태공간 방정식을 정의하고, 해저면에 분포된 각 센서노드의 측정정보를 나타내는 측정 방정식에 대해 정의한다[10].

1. 등속 운동 모델

등속(CV: Constant Velocity)으로 운동하는 표적의 상태벡터는 2차원 좌표계에서 위치와 속도 성분으로 구성되므로 k 번째 시간에서의 상태벡터 $X_{CV}(k)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_{CV}(k) = [x(k) \dot{x}(k) y(k) \dot{y}(k)]^T, \quad (1)$$

여기서 $x(k)$ 는 x 방향의 위치, $\dot{x}(k)$ 는 x 방향의 속도, $y(k)$ 는 y 방향의 위치, 그리고 $\dot{y}(k)$ 는 y 방향의 속도를 나타낸다.

등속 운동하는 표적의 상태공간 방정식은 식 (1)의 상태벡터 $X_{CV}(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_{CV}(k+1) = F_{CV}X_{CV}(k) + w_{CV}(k), \quad (2)$$

여기서 F_{CV} 는 등속 운동 모델의 상태 천이행렬(state transition matrix)을 나타내고, $w_{CV}(k)$ 는 평균이 0이고 정규 분포 $N(0, Q_{CV}(k))$ 의 특징을 가지는 백색(white)의 독립적

인(independent) 공정잡음(process noise) 벡터이다. 각각의 등속 운동 모델의 상태 천이행렬과 공정잡음 공분산행렬은 다음과 같다[11].

$$F_{CV} = \text{diag}[F_2 F_2], \quad (3)$$

$$Q_{CV}(k) = \text{diag}[Q_2 Q_2] q_{CV}, \quad (4)$$

여기서

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4} & \frac{T^3}{2} \\ \frac{T^3}{2} & T^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

q_{CV} 는 등속 운동 모델의 공정잡음 강도(intensity)를 의미하고, T 는 각 샘플간의 시간 간격 즉, 샘플링 시간을 의미한다.

2. 등가속 운동 모델

등가속(CA: Constant Acceleration)으로 운동하는 표적의 상태벡터는 등속 운동 모델의 상태벡터인 위치, 속도에 가속도 성분이 추가적으로 구성되므로, k 번째 시간에서의 상태벡터 $X_{CA}(k)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_{CA}(k) = [x(k) \dot{x}(k) \ddot{x}(k) y(k) \dot{y}(k) \ddot{y}(k)]^T, \quad (6)$$

여기서 $x(k)$, $\dot{x}(k)$, $\ddot{x}(k)$ 는 x 방향의 위치, 속도, 그리고 가속도를 나타내고, $y(k)$, $\dot{y}(k)$, $\ddot{y}(k)$ 는 y 방향의 위치, 속도, 그리고 가속도를 나타낸다.

등가속 운동하는 표적의 상태공간 방정식은 식 (6)의 상태벡터 $X_{CA}(k)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$X_{CA}(k+1) = F_{CA} X_{CA}(k) + w_{CA}(k), \quad (7)$$

여기서 F_{CA} 는 등가속 운동 모델의 상태 천이행렬을 나타내고, $w_{CA}(k)$ 는 평균이 0이고 정규분포 $N(0, Q_{CA}(k))$ 의 특징을 가지는 백색(white)의 독립적인(independent) 공정잡음(process noise) 벡터이다. 각각의 등가속 운동 모델의 상태 천이행렬과 공정잡음 공분산행렬은 다음과 같다[11].

$$F_{CA} = \text{diag}[F_3 F_3], \quad (8)$$

$$Q_{CA}(k) = \text{diag}[Q_3 Q_3] q_{CA}, \quad (9)$$

여기서

$$F_3 = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q_3 = \begin{bmatrix} \frac{T^4}{4} & \frac{T^3}{2} & \frac{T^2}{2} \\ \frac{T^3}{2} & T^2 & T \\ \frac{T^2}{2} & T & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

q_{CA} 는 등가속 운동 모델의 공정잡음 강도를 의미한다.

3. 측정 방정식

수중 무선센서망의 해저면에 분포된 N 개의 수중 센서노드들은 2차원 좌표계로 표현할 수 있으며, 좌표 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ 에 위치한 각각의 센서노드 $s_1, s_2, \dots, s_N$ 들이 k 번째 시간에서 측정치 $z_1(k), z_2(k),$

$\dots, z_N(k)$ 들을 제공한다고 가정하면, 측정 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \\ \vdots \\ z_i(k) \\ \vdots \\ z_N(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{CV}^1 X_{CV}(k) \\ H_{CV}^2 X_{CV}(k) \\ \vdots \\ H_{CV}^i X_{CV}(k) \\ \vdots \\ H_{CV}^N X_{CV}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \\ \vdots \\ v_i(k) \\ \vdots \\ v_N(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$= \begin{bmatrix} H_{CA}^1 X_{CA}(k) \\ H_{CA}^2 X_{CA}(k) \\ \vdots \\ H_{CA}^i X_{CA}(k) \\ \vdots \\ H_{CA}^N X_{CA}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \\ \vdots \\ v_i(k) \\ \vdots \\ v_N(k) \end{bmatrix},$$

여기서 H_{CV}^i , H_{CA}^i 는 i 번째 센서노드 s_i 의 등속 운동 모델 및 등가속 운동 모델의 측정행렬(measurement matrix)이며, $v_i(k)$ 는 평균이 0이고 정규분포 $N(0, R_i(k))$ 의 특징을 가지는 백색의 독립적인 측정잡음(measurement noise) 벡터이다[12]. 본 논문에서 적용된 수중 센서노드들은 표적의 위치정보만을 측정할 수 있다고 가정하였기 때문에 각각의 센서노드들의 측정행렬 H_{CV}^i , H_{CA}^i 는 식 (12)와 같이 정의할 수 있으며, 모든 센서노드들의 측정행렬 H_{CV}^i , H_{CA}^i 는 센서노드들에 상관없이 동일하기 때문에 첨자 i 를 생략한 형태인 H_{CV} , H_{CA} 로 표현할 수 있다.

$$H_{CV}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad H_{CA}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

그리고 수중 무선센서망의 각 센서노드들의 측정치 정보를 융합한 융합 측정치 $z_{fusion}(k)$ 와 융합 공분산행렬 $R_{fusion}(k)$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$z_{fusion}(k) = \frac{R_s(k)}{R_t(k) + R_s(k)} z_t(k) + \frac{R_t(k)}{R_t(k) + R_s(k)} z_s(k), \quad (13)$$

$$R_{fusion}(k) = \frac{R_t(k) R_s(k)}{R_t(k) + R_s(k)}, \quad (14)$$

여기서 $z_t(k)$ 와 $R_t(k)$ 는 k 번째 시간에서 센서노드 s_t 의 측정치와 공분산행렬을 나타내고, $z_s(k)$ 와 $R_s(k)$ 는 k 번째 시간에서 센서노드 s_s 의 측정치와 공분산행렬을 나타낸다.

III. 칼만필터 기반 분산형 표적추적 알고리즘

칼만필터는 시스템 모델을 기초로 하여 매 샘플링마다 오차 제곱의 평균값을 최소화시키는 알고리즘이다. 표적추적을 위해 사용되는 알고리즘에는 여러 가지 복잡한 알고리즘들이 있지만, 칼만필터는 단지 평균과 분산값만을 계산하여 각 센서노드간 통신하기 때문에 칼만필터에 기반한 분산형 표적추적필터는 결과적으로 수중 무선센서망의 통신부담을 감소시켜 배터리 수명을 연장시키는 장점을 가질 수 있다.

1. 칼만필터

먼저, 본 절에서 소개되는 칼만필터의 기본적인 식들의 첨자 $_{CV/CA}$ 는 칼만필터에 적용된 등속 및 등가속 운동 모델을 의미한다. 즉, 등속 운동 모델을 이용하여 칼만필터를 구동한 경우 첨자 $_{CV}$ 를 적용하고, 등가속 운동 모델을 이용한 경우 첨자 $_{CA}$ 만을 적용하면 된다.

일반적으로 칼만필터는 상태벡터를 추정하기 위한 예측(prediction) 및 갱신(update) 알고리즘으로 구성된다. 예측 방정식은 식 (15)의 상태추정치 예측과 식 (16)의 상태 추정오차 공분산행렬 예측으로 표현되며, 두 식을 통해 다음 상태 및 공분산을 예측한다.

$$\hat{X}_{CV/CA}(k+1|k) = F_{CV/CA} \hat{X}_{CV/CA}(k|k), \quad (15)$$

$$P_{CV/CA}(k+1|k) = F_{CV/CA} P_{CV/CA}(k|k) F_{CV/CA}^T + Q_{CV/CA}(k), \quad (16)$$

여기서 $P_{CV/CA}(k+1|k)$ 는 예측된 상태벡터와 실제 상태벡터간의 오차 공분산을 나타내는 행렬이다.

식 (15), (16)의 예측 방정식을 통해 얻어진 상태 추정치 예측값과 상태 추정오차 공분산행렬 예측값은 단순히 예측값을 나타낼 뿐이므로 표적의 정확한 상태 추정치 즉, 갱신된 상태 추정치를 얻기 위해 식 (13)에서 얻어진 현재의 융합 측정치 $z_{fusion}(k+1)$ 를 반영한 갱신 방정식을 이용한다. 실제 융합 측정치 $z_{fusion}(k+1)$ 와 예측된 융합 측정치 $\hat{z}_{fusion}^{CV/CA}(k+1|k)$ 의 차이로 정의되는 이노베이션(innovation)은 다음과 같다.

$$\gamma_{fusion}^{CV/CA}(k+1) = z_{fusion}(k+1) - \hat{z}_{fusion}^{CV/CA}(k+1|k). \quad (17)$$

이노베이션의 공분산행렬은 아래 식 (18)로 계산할 수 있으며,

$$S_{CV/CA}(k+1) = H_{CV/CA} P_{CV/CA}(k+1|k) H_{CV/CA}^T + R_{fusion}(k+1), \quad (18)$$

칼만필터의 이득값은 아래 식 (19)로 얻어진다.

$$K_{CV/CA}(k+1) = P_{CV/CA}(k+1|k) H_{CV/CA}^T \times S_{CV/CA}^{-1}(k+1). \quad (19)$$

식 (19)에서 계산된 칼만필터의 이득값을 이용하여 상태 추정값과 상태 오차 공분산값을 아래의 식을 통해 갱신할 수 있다.

$$\hat{X}_{CV/CA}(k+1|k+1) = \hat{X}_{CV/CA}(k+1|k) + K_{CV/CA}(k+1) \gamma_{fusion}^{CV/CA}(k+1), \quad (20)$$

$$P_{CV/CA}(k+1|k+1) = P_{CV/CA}(k+1|k) - [K_{CV/CA}(k+1) \times H_{CV/CA} P_{CV/CA}(k+1|k)]. \quad (21)$$

2. 분산형 표적추적 알고리즘

기존의 중앙 집중식 구조는 모든 센서 측정치들이 중앙 처리장치로 보내어지는 구조이므로 제한된 통신 대역폭을 가진 중앙처리장치는 모든 센서노드들과 통신을 수행해야 하는 통신부담과 같은 에너지문제가 발생한다. 따라서 수중

그림 2. 분산형 표적추적 알고리즘.

Fig. 2. Distributed target tracking algorithm.

무선센서망에서는 통신 및 에너지 문제를 해결하기 위해 분산식 구조를 사용한다. 분산식 구조에서는 표적의 예측치 근처의 센서군을 선정하고, 표적 근처에 있는 센서노드를 프로세싱 노드로 선택함으로써 중앙 집중식 구조의 모든 센서노드들의 측정치 정보를 사용할 때보다 통신부담을 줄일 수 있고, 나머지 다른 센서노드들은 수면 모드를 취함으로써 결과적으로 수중 무선센서망을 구성하는 센서노드들의 배터리 수명을 연장시키는 에너지 절감 효과도 가져온다.

그림 2는 분산형 표적추적 알고리즘의 기본적인 구조를 나타낸다. 여기서 점선으로 표시된 원은 각 센서노드의 탐지 영역을 나타내고 실선으로 표시된 타원들은 칼만필터의 예측 및 갱신 과정을 통해 얻어지는 매 샘플링 단계에서의 표적의 상태 예측(큰 타원) 및 갱신 영역(작은 타원)을 나타낸다. k 번째 시간에는 표적의 최종 상태 추정치가 타원 내에 존재하고, 다음 샘플링 단계인 $k+1$ 번째 시간에는 표적의 예측된 상태 추정 영역을 나타내는 새로운 타원이 생기게 된다. k 번째 시간에서의 프로세싱 노드 A는 $k+1$ 번째 시간에서 예측된 추정 타원의 중심에 가장 가까운 센서노드 B를 새로운 프로세싱 노드로 선택하고 이전 프로세싱 노드 A의 모든 정보들은 새로운 프로세싱 노드 B로 전송된다. 새로운 프로세싱 노드 B는 예측된 상태 추정 타원 내부에 존재하는 센서노드 측정치 정보들을 수집하고, 수집된 측정치 정보만을 바탕으로 분산식 칼만필터를 구동하여 표적의 존재 영역을 나타내는 새로운 갱신된 타원을 형성한다. 결과적으로 분산형 표적추적 알고리즘은 이러한 일련의 과정들이 매 샘플링 시간마다 순환적으로(recursively) 반복되어 표적을 추적하는 구조이다.

IV. 센서노드 선정기법

본 장에서는 분산형 표적추적 알고리즘을 위한 에너지 효율적인 센서노드 선정기법들을 제안한다. 제안된 기법들을 통해 분산형 표적추적 알고리즘은 통신 부담을 줄임으로써 센서노드 배터리 소모를 줄일 수 있다.

1. 활성/비활성 센서 선정기법

본 절에서는 표적의 상태 예측영역을 나타내는 3σ 원 내

그림 3. 활성 및 비활성 센서노드들.

Fig. 3. Waked-up/sleeping sensor nodes.

에 존재하는 센서노드만을 활성화하는 기법을 제안한다. 그림 3에 개략적으로 활성/비활성 센서 선정기법이 도시되어 있다. 칼만필터를 통해 얻어지는 예측 및 갱신 단계의 상태 추정 타원은 x, y 축의 잡음성분이 서로 동일하고 독립적이라고 가정하기 때문에 원으로 나타낼 수 있다. 그림 3에서 점선으로 표현된 작은 원은 각 센서노드의 탐지영역을 나타내고, 좌측 아래에 실선으로 표시된 원은 k 번째 시간에서 99.73%, 즉 $3\sigma(k)$ 의 확률로 표적이 존재하는 갱신 단계의 상태추정 영역을 나타낸다. $k+1$ 번째 시간에서는 그림 3의 가운데 부분에 굵은 실선의 원으로 표시된 영역에 표적의 상태가 존재할 것이라고 예측한다.

$k+1$ 번째 시간에서 표적의 예측된 위치와 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 간의 거리를 $d_{i,CV/CA}(k+1)$ 라고 하면, $d_{i,CV/CA}(k+1)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{i,CV/CA}^2(k+1) = \left(\hat{X}_x^{CV/CA}(k+1|k) - s_{i,x}(k+1) \right)^2 + \left(\hat{X}_y^{CV/CA}(k+1|k) - s_{i,y}(k+1) \right)^2, \quad (22)$$

여기서 $\hat{X}_x^{CV/CA}(k+1|k)$ 와 $\hat{X}_y^{CV/CA}(k+1|k)$ 는 표적의 x, y 축 상의 예측된 위치를 의미하고, $s_{i,x}(k+1)$ 와 $s_{i,y}(k+1)$ 는 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 의 x, y 축 상의 위치를 의미한다.

그림 4는 활성/비활성 센서 선정기법을 보여준다. 이 기법은 N 개의 센서노드로부터 예측된 $3\sigma(k+1)$ 원과 교차영역이 존재하는 n 개의 센서노드를 활성화시킨다. 교차영역의 존재유무는 식 (23)을 이용하여 파악할 수 있다.

$$d_{i,CV/CA}(k+1) \leq r_i(k+1) + 3\sigma(k+1), \quad (23)$$

여기서 $r_i(k+1)$ 는 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 의 탐지반경을 의미한다.

식 (23)을 만족하는 n 개의 센서노드들은 활성화되어 표적을 탐지할 준비를 한다. 그림 2~3에서 검은색의 중심을 가진 원으로 표시된 센서노드들이 활성화된 센서노드들이다. 그리고 나머지 $N-n$ 개의 센서노드들은 식 (24)를 만족할 경우 비활성 상태로 유지되게 된다.

그림 4. 활성 및 비활성 센서 선정기법.

Fig. 4. Waked-up/sleeping (WuS) sensor node selecting scheme.

$$d_{i,CV/CA}(k+1) > r_i(k+1) + 3\sigma(k+1). \quad (24)$$

그림 3에서 가운데 부분의 격자무늬를 가진 원으로 표시된 새로운 프로세싱 노드 $s_p(k+1)$ 는 식 (25)과 같이, 표적의 예측된 위치와 센서노드 $s_i(k+1)$ 간의 거리 $d_{i,CV/CA}(k+1)$ 중 가장 작은 거리를 가지는 센서노드로 선택된다.

$$\min(d_{1,CV/CA}(k+1), \dots, d_{n,CV/CA}(k+1)). \quad (25)$$

새롭게 선택된 프로세싱 노드 $s_p(k+1)$ 를 기준으로 표적의 상태를 예측 및 갱신하는 알고리즘이 순환적으로 수행되게 된다.

2. 유효 측정치 선정기법

활성/비활성 센서 선정기법을 통해 활성 센서노드로 선정되었다 할지라도 모두 표적을 측정할 수 있는 것은 아니다. 그 이유는 활성/비활성 센서 선정기법을 통해 예측된 $3\sigma(k+1)$ 원 내에 센서노드가 존재하여 활성화되더라도 센서노드의 실제 탐지반경 내에 표적이 존재하지 않으면 측정값을 제공할 수 없기 때문이다. 따라서 본 절에서는 활성화된 센서들의 유효성을 판단하는 기법을 제시한다.

그림 5는 유효 측정치 선정기법을 개략적으로 보여준다. 이 기법은 활성 센서노드의 탐지영역과 실제 표적의 위치와의 관계를 통해 활성 센서노드의 유효성을 판별하는 기법이다. 그림 5에서 별모양으로 표시된 실제 표적의 위치는 II 장에서 정의된 측정 방정식을 통해 얻을 수 있다. 실제 표적의 위치 $z_i(k+1)$ 와 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 간의 거리를 $D_i(k+1)$ 라고 하면, 거리 $D_i(k+1)$ 는 식 (26)로 계산할 수 있다.

그림 5. 유효 측정치 선정기법.

Fig. 5. Valid measurement (VM) selecting scheme.

$$D_i^2(k+1) = (z_{i,x}(k+1) - s_{i,x}(k+1))^2 + (z_{i,y}(k+1) - s_{i,y}(k+1))^2, \quad (26)$$

여기서 $z_{i,x}(k+1)$ 와 $z_{i,y}(k+1)$ 는 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 의 x, y 축 상의 측정치를 의미하고, $s_{i,x}(k+1)$ 와 $s_{i,y}(k+1)$ 는 i 번째 센서노드 $s_i(k+1)$ 의 x, y 축 상의 위치를 의미한다.

유효 측정치 선정기법은 $D_i(k+1)$ 와 $r_i(k+1)$ 의 크기비교를 통해 각 센서노드들의 유효성을 판별하여 실제적으로 표적을 탐지하여 프로세싱 노드로 측정치 정보를 보낼 수 있는 m 개의 유효한 센서노드들을 선택하는 기법이다. 만약 $D_i(k+1) \leq r_i(k+1)$ 이면, 이를 만족하는 센서노드들은 유효하다고 판단되어 프로세싱 노드에 측정치 정보를 전달할 수 있게 된다. 하지만 나머지 $n-m$ 개의 센서노드들은 $D_i(k+1) > r_i(k+1)$ 를 만족하여 유효하지 못하고 결과적으로 더 이상 표적을 탐지할 수 없게 된다. 유효 측정치 선정기법을 통해 선정된 유효 센서노드들은 프로세싱 노드 $s_p(k+1)$ 에 m 개의 측정치 $z_1(k+1), z_2(k+1), \dots, z_m(k+1)$ 를 제공하고, 프로세싱 노드는 II 장의 식 (13), (14)와 같이 모든 유효 측정치를 $Z_{valid}(k+1)$ 의 융합(fusion)을 통해 하나의 융합된 측정치 $z_{fusion}(k+1)$ 를 계산한다. 융합된 측정치를 III 장에서 설명한 분산형 칼만필터의 갱신 방정식에 적용하여 상태 추정값과 상태 오차 공분산값을 갱신할 수 있다. 최종적으로 칼만필터에 기반하여 활성/비활성 센서 선정기법과 유효 측정치 선정기법을 적용한 분산형 표적추적필터는 그림 6과 같이 나타낼 수 있으며, 매 샘플링 시간마다 활성 센서노드와 유효 센서노드의 존재유무를 조사한다. 만약 두 가지 센서노드 모두 존재하지 않으면 분산형 칼만필터의 계인값을 구할 수 없어 식 (27), (28)의 Update step I을 적용하여 이전 시간의 상태 및 오차 공분산행렬 예측값을 그대로 사용한다. 반대로 두 가지 센서노드가 모두 존재하는 경우에는 분산형 칼만필터의 계인값을 구할 수 있으므로, 식 (29), (30)과 같이 Update step II를 적용하여 이전 시간의 상태 및 오차 공분산행렬 갱신값

을 사용하게 되며, 이는 III 장에서 설명한 식 (20), (21)과 동일한 결과이다.

Update Step I:

$$\hat{X}_{CV/CA}(k+1|k+1) = \hat{X}_{CV/CA}(k+1|k), \quad (27)$$

$$P_{CV/CA}(k+1|k+1) = P_{CV/CA}(k+1|k). \quad (28)$$

Update Step II:

$$\hat{X}_{CV/CA}(k+1|k+1) = \hat{X}_{CV/CA}(k+1|k) + K_{CV/CA}(k+1)\gamma_{fusion}^{CV/CA}(k+1), \quad (29)$$

$$P_{CV/CA}(k+1|k+1) = P_{CV/CA}(k+1|k) - K_{CV/CA}(k+1)H_{CV/CA}P_{CV/CA}(k+1|k). \quad (30)$$

따라서 매 샘플링 시간마다 활성 센서노드 선정 및 유효 측정치를 선정하는 과정들이 순환적으로 반복되며 표적을 예측 및 갱신하며 추적하게 된다.

본 장에서는 활성/비활성 센서 선정기법을 통해 수중 무선센서망을 구성하는 모든 센서노드들 중에 표적 주변에 있는 단지 몇 개의 센서노드들만을 활성화하고, 유효 측정치 선정기법을 통해 활성 센서노드들 중 실제적으로 표적을 탐지하여 측정치 정보를 줄 수 있는 유효 센서노드들을 선정하는 기법에 대해 제안하였다. 제안된 기법을 통해 프로세싱 노드는 모든 센서노드 정보를 사용하지 않고, 활성화된 센서노드들과 통신함으로써 결과적으로 계산량 뿐만 아니라 에너지 효율면에서도 좋은 결과를 얻을 수 있다.

V. 시뮬레이션

표적은 그림 7과 같이 수중 무선센서망의 센서노드가 설치된 해저면에서 초기 위치 (4000m, -200m)에서 좌측으로 저기동 운동을 한다고 가정한다. 수중 무선센서망 구축을 위해 4000m × 2000m 영역에 음향 센서노드를 일정 간격으로 설치하였으며, 각각의 음향 센서노드의 위치정보는 사전에 알고 있으며, 표적의 위치정보만을 탐지할 수 있다고 가정한다. 이는 국방과학연구소에서 요구하는 환경조건이며, 랜덤 분포의 센서노드 환경일 경우에도 [5]에서 제시한 센서노드 위치인식 알고리즘에 의해 센서노드들의 위치를 계산하여 표적추적을 수행할 수 있다. 그리고 샘플링 간격 T 는 0.1초, 등속 운동 모델의 공정잡음 강도 q_{CV} 는 $2m^2/sec^4$, 등가속 운동 모델의 공정잡음 강도 q_{CA} 는 $4m^2/sec^4$ 로 설정한다. 그리고 측정치 공분산행렬 $R_i(k)$ 와 등속 운동 모델 및 등가속 운동 모델의 상태 오차 공분산행렬 초기값 $P_{CV}(0)$ 와 $P_{CA}(0)$ 는 다음과 같이 설정한다.

$$R_i(k) = \begin{bmatrix} 12^2 & 3^2 \\ 3^2 & 12^2 \end{bmatrix} m^2, \quad (31)$$

$$P_{CV}(0) = 10^2 I(4 \times 4) m^2, \quad P_{CA}(0) = 10^2 I(6 \times 6) m^2. \quad (32)$$

모든 센서노드의 탐지반경은 150m로 동일하다고 가정하고, 각 센서노드 간의 간격은 200m로 균일하게 분포되어 있다고 가정한다.

그림 6. 칼만필터 기반 분산형 표적추적필터.

Fig. 6. Kalman filter based distributed target tracking filter.

그림 7. 센서노드 분포 및 표적의 실제/추정 궤적.

Fig. 7. Sensor node distribution and real/estimated target trajectory.

그림 8. 활성/비활성 및 유효 센서노드.

Fig. 8. Waked-up/sleeping and valid sensor nodes.

그림 7은 200m 간격으로 분포된 센서노드들, 그리고 수중 무선센서망에서 저기동 운동을 하는 표적의 실제 궤적과 등속 운동 모델 및 등가속 운동 모델에 기반한 칼만 필터의 추정된 궤적을 보여준다. 두 가지 운동 모델의 추정된 궤적들은 실제 궤적과 전반적으로 유사한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 그림 8은 본 논문에서 제안한 활성/비활성 센서 선정기법과 유효 측정치 선정기법을 통해 얻어진 활성 센서노드와 유효 센서노드를 표현한 그림이다. 그림에서 ‘*’로 표현된 센서노드는 활성 센서노드를 나타내고, ‘o’로 표현된 센서노드는 유효 센서노드를 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안한 분산형 표적추적필터는 수중 무선센서망을 구성하는 모든 센서노드들의 정보를 사용하지 않고, 표적이 이동하는 궤적 근처의 센서노드 정보만을 이용하여 효과적으로 표적을 추적하는 것을 볼 수 있다. 그림 9와 그림 10은 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 등속 운동 모델 및 등가속 운동 모델의 위치 RMS 오차와 속도 RMS 오차를 보여준다. 두 가지 운동 모델 모두 공통적으로 표적추적 초

그림 9. 위치 RMS 오차.

Fig. 9. Position RMS error.

그림 10. 속도 RMS 오차.

Fig. 10. Velocity RMS error.

기단계에는 초기 오차성분에 의해 RMS 값이 다소 증가하는 증상을 보이지만, 약 2초 후 즉, 20번의 샘플링 후 안정화되는 결과를 볼 수 있다. 시뮬레이션이 진행될수록 등속 운동 모델의 추정오차는 다소 증가하는 결과를 볼 수 있는데, 그 이유는 실제 표적은 저기동 운동을 하고 있으나 등속 운동 모델에 기반한 분산형 칼만필터를 구현하였기 때문에 모델링 오차로 인하여 저기동을 탐지하지 못하기 때문이다. 하지만 전체 표적추적 구간에서 위치 RMS 오차가 20m 미만이고, 속도 RMS 오차도 10m/sec 미만으로 발산하지 않는 추적성능을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 등가속 운동 모델을 적용한 칼만필터의 경우 표적의 실제 궤적과의 모델링 오차가 줄어들어 효과적으로 저기동을 탐지할 수 있으므로, 그림에서 나타난 바와 같이 2m 이하의 위치 RMS 오차와 2m/sec 이하의 속도 RMS 오차의 안정적인 추적성능을 보여주는 것을 알 수 있다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 분산형 구조의 칼만필터는 표적이 저기동 운동을 할 경우, 적용된 표적의 운동 모델의 종류에 따라 큰 차이 없는 안정적인 추적 성능을 보여줄 수 있다.

VI. 결론

본 논문은 수중 무선센서망 환경에서의 분산형 표적추적 필터에 관한 최초의 연구결과로서, 수중 무선센서망에서 저기동하는 단일 표적의 상태 추정을 위해 칼만필터를 기반으로 활성/비활성 센서 선정기법과 유효 측정치 선정기법을 적용한 에너지 효율적인 분산형 표적추적필터를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 표적의 예측영역 주위의 센서군을 선정하여 통신 부담을 줄임으로써 결과적으로 각 센서노드에서 소비되는 에너지를 절감할 수 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 추적 정확성도 보장할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 적용한 균일분포의 센서노드 배치 환경조건은 국방과학연구소에서 요구하는 환경조건이며, 랜덤 분포의 센서노드 배치 환경조건에서의 분산형 표적추적필터와 수중 무선센서망에서 고기동하는 표적에 대처하는 표적추적필터에 대해 별도의 연구 결과로 향후 발표할 예정이다. 그리고 향후 연구에서는 수중 통신문제(시간 지연, 초음파 신호의 비직진성 등)와 같은 수중 환경의 특수성에 대한 연구와 함께 기존의 중앙집중식 구조와 본 논문에서 제안한 분산형 구조의 장단점을 비교할 수 있는 정량적 척도를 제시할 계획이다.

REFERENCES

- [1] C.-Y. Chong, F. Zhao, S. Mori, and S. Kumar, "Distributed tracking in wireless ad hoc sensor networks," *Proc. of the Sixth International Conference of Information Fusion*, vol. 1, pp. 431-438, 2003.
- [2] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006)*, vol. 1, pp. 228-235, 2006.
- [3] D.-H. Lee, H. W. Kim, and J.-M. Lee, "Obstacle recognition and avoidance of the bio-mimetic underwater robot using IR and compass sensors," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 18, no. 10, pp. 928-933, Oct. 2012.
- [4] J. Heidemann, Y. Li, and A. Syed, "Underwater sensor networking: research challenges and potential applications," USC/ISI Technical Report ISI-TR-2005-603, 2005.
- [5] K. H. Lee, C. H. Yu, J. W. Choi, and Y. B. Seo, "ToA based sensor localization algorithm in underwater wireless sensor network," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 15, no. 6, pp. 641-648, Jun. 2009.
- [6] R. R. Brooks, P. Ramanathan, and A. M. Sayeed, "Distributed target classification and tracking in sensor networks," *Proc. of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1163-1171, Aug. 2003.
- [7] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges," *Proc. of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.

- [8] C. H. Yu, K. H. Lee, J. W. Choi, and Y. B. Seo, "Distributed single target tracking in underwater wireless sensor networks," *Proc. of the 47th SICE Conference (SICE'08)*, Chofu City, Tokyo, Japan, pp. 1351-1356, Aug. 2008.
- [9] D. G. Park, K. M. Kwak, W. K. Chung, and J. H. Kim, "Infrastructure-based localization system using underwater wireless sensor network," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 699-705, Aug. 2012.
- [10] X. R. Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part I: dynamic models," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 103-123, 1998.
- [11] Y. Bar-Shalom, X. R. Li, and T. Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [12] W. Xiao, L. Xie, J. Lin, and J. Li, "Multi-sensor scheduling for reliable target tracking in wireless sensor networks," *Proc. of the 6th International Conference on ITS Telecommunications*, pp. 996-1000, 2006.

유 창 호

2002년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2002년~현재 부산대학교 대학원 지능 기계공학과 석·박사 통합과정. 2009년 8월 ICROS-SICE International Joint Conference 2009 수여 Student Travel Grant Award 수상. 관심분야는 수중 무선센서망 표적추적필터 이론, 센서 로컬라이제이션 이론, 항법 및 유도제어 시스템.

최 재 원

1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 공학석사. 1995년 서울대학교 대학원 제어계측공학과 공학박사. 1999년 8월~현재 IFAC Technical Committee on Aerospace 및 Technical Committee on Linear Control Systems 운영위원. 현재 부산대학교 기계공학부 교수. 2000년 5월 한국과학기술단체총연합회 수여 제10회 과학기술우수논문상 수상. 2002년 4월 제35회 과학의 날 과학기술진흥유공포상 국무총리 표창수상. 2008년 10월 제어로봇시스템학회 고명삼 학술상수상. 2009년 11월 공학교육혁신유공 교육과학기술부장관 표창. 관심분야는 추적필터 설계, 선형시변시스템 제어이론.